

CORTINAS ESCORADAS PARA SUPORTE DE ESCAVAÇÕES

O Pré-esforço do escoramento por via do
subfaseamento da escavação

PEDRO MAGALHÃES GOMES

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM GEOTECNIA

Orientador: Professor Doutor Manuel António de Matos Fernandes

JUNHO DE 2009

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2008/2009

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil - 2008/2009 - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2009.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respectivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão electrónica fornecida pelo respectivo Autor.

A meus Pais

*Ser homem é ser responsável.
É sentir que colabora na construção do mundo
Antoine de Saint-Exupéry*

AGRADECIMENTOS

Deseja o autor expressar os seus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que de algum modo contribuíram para a realização deste trabalho, em especial:

- ao Professor Doutor Manuel Matos Fernandes, orientador científico desta dissertação, pelo empenho, dedicação e disponibilidade demonstrada, pela quantidade e qualidade de ensinamentos transmitidos que fizeram despertar em mim o interesse pela Geotecnia;
- ao Engenheiro Nuno Raposo pela disponibilidade e excelente ajuda na compreensão do modelo *hardening soil*;
- ao Engenheiro António Topa Gomes por algumas sugestões apresentadas;
- A todos os colegas e amigos, nomeadamente aos de Geotecnia, pela boa disposição, companheirismo e trocas de conhecimento, que de algum modo, ajudaram a enriquecer este trabalho.

Quer por fim o autor expressar a profunda gratidão e estima a toda a família, particularmente aos seus Pais, pelo apoio incondicional que sempre prestaram, principalmente nos momentos de desânimo.

RESUMO

Nas escavações suportadas por cortinas escoradas o pré-esforço do escoramento é uma das vias mais eficazes para controlar os movimentos induzidos na envolvente. Por vezes, verifica-se que apenas de um dos lados da escavação é imperioso minimizar os deslocamentos por aí se situarem construções sensíveis e valiosas e não do lado oposto. Nessas circunstâncias, em cada fase de escavação, se a remoção das terras se iniciar do lado onde não existem as construções, isso permitirá mobilizar esforços nas escoras antes de remover as terras junto da cortina adjacente às construções que se pretende preservar de danos. Se as escavações forem suficientemente largas, esta metodologia consistirá num verdadeiro pré-esforço do escoramento por via do subfaseamento da escavação.

O trabalho consiste na simulação de escavações usando um programa de elementos finitos, PLAXIS®. Procura-se averiguar da eficácia do efeito descrito na redução dos deslocamentos de uma das cortinas em diversas condições, nomeadamente para diferentes larguras e diferentes características do maciço onde a escavação é inserida.

É efectuada a comparação entre dois modelos constitutivos do solo, o modelo linear elástico-perfeitamente plástico e o modelo não linear, do tipo hiperbólico, designado *hardening soil model*, para a simulação da escavação em estudo.

Por fim, foi analisada a mesma escavação considerando as escoras com um comportamento não linear.

PALAVRAS-CHAVE: Escavações urbanas, solos moles, cortinas escoradas, pré-esforço, movimentos induzidos pela escavação.

ABSTRACT

In deep excavations supported by flexible strutted walls the prestress of the struts is one of the most efficient ways to control induced movements. In some cases, it is imperious to minimize movements just in one side of the excavation, due to nearby sensitive buildings on that side and not on the opposite one. Under these circumstances, in each phase, if the excavation begins on the side without buildings, it will induce the mobilization of struts forces before the soil removal near the buildings which are intended to protect. If the excavation is sufficiently wide, this methodology will consist in a truly prestressed strut system though the subdivision of each excavation stage.

This work consists of the simulation of excavations using a finite element program, PLAXIS®. It is intended to investigate the effectiveness of the described effect on the movement reduction of one of the walls in several conditions, namely for different widths and soil characteristics where the excavation is made.

A comparison between two soil constitutive models for simulating the excavation in study is carried out, the linear elastic-perfectly plastic and the nonlinear models of the hyperbolic type, called hardening soil model.

Finally, the same excavation was analysed considering a non linear behaviour for struts.

KEYWORDS: Urban Excavations, Soft Soils, Braced Excavations, Prestressing, Movements due to Excavation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
ABSTRACT	V
 1 INTRODUÇÃO	 1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. OBJECTIVO	2
1.3. ÂMBITO	3
 2 IMPORTÂNCIA DO PRÉ-ESFORÇO	 5
2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	5
2.2. PRÉ-ESFORÇO EM ANCORAGENS	6
2.3. ESCORAS OU ANCORAGENS?	10
2.4. COMO PODE SER FEITO O PRÉ-ESFORÇO EM ESCORAS?	12
2.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	12
2.4.2. SISTEMA TRADICIONAL DE PRÉ-ESFORÇO	12
2.4.3. PRÉ-ESFORÇO COM MANUTENÇÃO DOS MACACOS EM CARGA	15
2.4.4. PRÉ-ESFORÇO COM CABOS	16
2.4.5. TEMPERATURA	16
2.4.6. PRÉ-ESFORÇO COM FASEAMENTO DA ESCAVAÇÃO	17
 3 ANÁLISES COM UM MODELO DE SOLO ELÁSTICO- PERFEITAMENTE PLÁSTICO	 19
3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	19
3.2. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO NUMÉRICO EFECTUADO	20
3.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	20
3.2.2. CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO	20
3.2.3. ESTRUTURA DE SUPORTE	20
3.2.4. FASEAMENTO CONSTRUTIVO	23
3.2.4.1. Considerações gerais	23
3.2.4.2. Escavação não subfaseada (NF)	23

3.2.4.3. Escavação subfaseada (SF)	24
3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS – ESCAVAÇÃO COM LARGURA DE 80 M	26
3.3.1. MOVIMENTOS ASSOCIADOS	26
3.3.2. ESTADO DE TENSÃO	34
3.3.3. ESFORÇOS ESTRUTURAIS	41
3.4. ANÁLISE DE RESULTADOS – TODAS AS LARGURAS DE ESCAVAÇÃO	44
3.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS	44
3.4.2. MOVIMENTOS ASSOCIADOS	44
3.4.3. ESFORÇOS ESTRUTURAIS	46
3.5. ANÁLISE DE RESULTADOS – CÁLCULOS COMPLEMENTARES.....	48
3.5.1. CÁLCULOS COM O SOLO MAIS RÍGIDO ($E_u = 800.c_u$)	48
3.5.2. CÁLCULOS COM AS ESCORAS COM PRÉ-ESFORÇO CONVENCIONAL	49
3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50

4 ANÁLISES COM UM MODELO CONSTITUTIVO COM A RIGIDEZ DEPENDENTE DA TRAJECTÓRIA DE TENSÕES 51

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	51
4.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO <i>HARDENING SOIL</i>	53
4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS – ESCAVAÇÃO COM LARGURA DE 80 M	57
4.3.1. MOVIMENTOS ASSOCIADOS	57
4.3.2. ESTADO DE TENSÃO	61
4.3.3. ESFORÇOS ESTRUTURAIS.....	67
4.4. ANÁLISE DE RESULTADOS – TODAS AS LARGURAS DE ESCAVAÇÃO	70
4.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	70
4.4.2. MOVIMENTOS ASSOCIADOS.....	70
4.4.3. ESFORÇOS ESTRUTURAIS.....	71
4.5. ANÁLISE DE RESULTADOS – CÁLCULOS COMPLEMENTARES.....	74
4.5.1. CÁLCULOS COM O SOLO MAIS RÍGIDO ($E_u = 800.c_u$)	74
4.5.2. CÁLCULOS COM ESCORAS COM PRÉ-ESFORÇO CONVENCIONAL.....	76
4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	77

5 ANÁLISES COM ESCORAS COM A RIGIDEZ AXIAL DEPENDENTE DO ESFORÇO AXIAL 79

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	79
5.2. CÁLCULOS EFECTUADOS	80
5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS – ENL20/40	81
5.3.1. MOVIMENTOS ASSOCIADOS	81
5.3.2. ESFORÇOS ESTRUTURAIS	83
5.4. ANÁLISE DE RESULTADOS – ENL12/48.....	89
5.4.1. MOVIMENTOS ASSOCIADOS	89
5.4.2. ESFORÇOS ESTRUTURAIS	91
5.5. ANÁLISE DE RESULTADOS – ENL20/80.....	95
5.5.1. MOVIMENTOS ASSOCIADOS	95
5.5.2. ESFORÇOS ESTRUTURAIS	96
5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
 6 CONCLUSÕES	 103
6.1. CONCLUSÕES.....	103
 BIBLIOGRAFIA	 105

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Esquema do pré-esforço das escoras através do faseamento da escavação (Matos Fernandes)	2
Figura 2.1 – Tensões no solo a escavar: a) antes; b) depois	6
Figura 2.2 – Escavação em argila suportada por uma cortina ancorada. Exemplo para estudo pelo m.e.f do efeito dos pré-esforços das ancoragens (Matos Fernandes, 1983)	7
Figura 2.3 – Resultados para a condição de pré-esforço nulo nas ancoragens (Matos Fernandes, 1983)	7
Figura 2.4 – Resultados para a condição de pré-esforço nas ancoragens com base do diagrama representado (Matos Fernandes, 1983).....	8
Figura 2.5 – Evolução dos deslocamentos da cabeça do 2º nível de ancoragens nos dois cálculos anteriores (Matos Fernandes, 1983).....	9
Figura 2.6 – Trajectória de tensões de um elemento do maciço suportado da escavação da Figura 2.4 (Matos Fernandes, 1983)	10
Figura 2.7 – Diagrama carga-deslocamento de uma ancoragem.....	11
Figura 2.8 – Diagrama carga-deslocamento de uma escora.....	11
Figura 2.9 – Diagrama carga-deslocamento de uma escora pré-esforçada.....	12
Figura 2.10 – Sistema tradicional de pré-esforço em escoras (adaptado de Perdigão, 1999)	13
Figura 2.11 – Pormenor do escoramento (Matos Fernandes, 2008).....	14
Figura 2.12 – Sistema tradicional com parafusos (adaptado de Perdigão, 1999).....	15
Figura 2.13 – Pré-esforço com cabos (adaptado de Perdigão, 1999)	16
Figura 2.14 – Pré-esforço com subfaseamento da escavação.....	17
Figura 3.1 – Início da escavação da Estação do Terreiro do Paço do Metropolitano de Lisboa	19
Figura 3.2 – Corte transversal da escavação analisada.....	21
Figura 3.3 – Tipos de elementos do PLAXIS®: (a) 6 pontos nodais; (b) 15 pontos nodais	22
Figura 3.4 – Malha de elementos finitos e condições fronteira.....	22
Figura 3.5 – Fase 1 da escavação não subfaseada	23
Figura 3.6 – Fase 2 da escavação não subfaseada	23
Figura 3.7 – Fase 3 da escavação não subfaseada	23
Figura 3.8 – Fase 4 da escavação não subfaseada	23
Figura 3.9 – Fase 5 da escavação não subfaseada	24
Figura 3.10 – Fase 6 da escavação não subfaseada	24
Figura 3.11 – Fase 2a da escavação subfaseada	24
Figura 3.12 – Fase 2b da escavação subfaseada	24
Figura 3.13 – Fase 3a da escavação subfaseada	25
Figura 3.14 – Fase 3b da escavação subfaseada	25
Figura 3.15 – Fase 4a da escavação subfaseada	25
Figura 3.16 – Fase 4b da escavação subfaseada	25
Figura 3.17 – Fase 5a da escavação subfaseada	25
Figura 3.18 – Fase 5b da escavação subfaseada	25
Figura 3.19 – Fase 6a da escavação subfaseada	25
Figura 3.20 – Fase 6b da escavação subfaseada	25
Figura 3.21 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.EP.NF	26
Figura 3.22 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.EP.SF	27
Figura 3.23 – Assentamentos da superfície – 80.EP.NF.....	28
Figura 3.24 – Relação entre os deslocamentos da parede e do terraplino (O'Rourke, 1981)	29

Figura 3.25 – Assentamentos da superfície – 80.EP.SF	30
Figura 3.26 – Movimento do fundo de escavação – Fase 1 – 80.EP.SF	31
Figura 3.27 – Movimento do fundo de escavação – Fase 2a – 80.EP.SF	31
Figura 3.28 – Movimento do fundo de escavação – Fase 2b – 80.EP.SF	31
Figura 3.29 – Movimento do fundo de escavação – Fase 3a – 80.EP.SF	31
Figura 3.30 – Movimento do fundo de escavação – Fase 3b – 80.EP.SF	32
Figura 3.31 – Movimento do fundo de escavação – Fase 4a – 80.EP.SF	32
Figura 3.32 – Movimento do fundo de escavação – Fase 4b – 80.EP.SF	32
Figura 3.33 – Movimento do fundo de escavação – Fase 5a – 80.EP.SF	32
Figura 3.34 – Movimento do fundo de escavação – Fase 5b – 80.EP.SF	33
Figura 3.35 – Movimento do fundo de escavação – Fase 6a – 80.EP.SF	33
Figura 3.36 – Movimento do fundo de escavação – Fase 6b – 80.EP.SF	33
Figura 3.37 – Malha com os elementos analisados	34
Figura 3.38 – Trajectórias de tensões totais do ponto A – 80.EP	35
Figura 3.39 – Trajectórias de tensões totais do ponto B – 80.EP	35
Figura 3.40 – Trajectórias de tensões totais do ponto C – 80.EP	36
Figura 3.41 – Trajectórias de tensões totais do ponto D – 80.EP	36
Figura 3.42 – Estrutura com as regiões analisadas	38
Figura 3.43 – Tensão horizontal das regiões A' e B' – 80.EP.SF	38
Figura 3.44 – Tensão horizontal das regiões C' e D' – 80.EP.SF	38
Figura 3.45 – Pressões de terra atrás da cortina – 80.EP	39
Figura 3.46 – Trajectórias de tensões totais dos pontos C e D – 80.EP.SF	40
Figura 3.47 – Pontos em plastificação – Fase 3a – 80.EP.SF	40
Figura 3.48 – Esforços nas escoras – 80.EP.NF	41
Figura 3.49 – Esforços nas escoras – 80.EP.SF	41
Figura 3.50 – Diagrama de pressões aparentes – 80.EP	42
Figura 3.51 – Envoltórios dos momentos flectores – 80.EP	43
Figura 3.52 – Variação da redução do deslocamento máximo da cortina em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – EP	44
Figura 3.53 – Variação da redução do assentamento em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – EP	45
Figura 3.54 – Variação do esforço axial das escoras em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – EP	47
Figura 3.55 – Variação dos momentos flectores em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – EP	48
Figura 4.1 – Relação hiperbólica entre a tensão primária e a extensão num ensaio triaxial drenado ..	52
Figura 4.2 – Modelo de elementos finitos do ensaio triaxial	53
Figura 4.3 – Resultado do ensaio triaxial de compressão 1 do estrato 3 ($400c_u$)	55
Figura 4.4 – Resultado do ensaio triaxial de extensão 4 do estrato 3	56
Figura 4.5 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.HS.NF	58
Figura 4.6 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.HS.SF	59
Figura 4.7 – Assentamentos da superfície – 80.HS.NF	60
Figura 4.8 – Assentamentos da superfície – 80.HS.SF	60
Figura 4.9 – Trajectórias de tensões totais do ponto A – 80.HS	62
Figura 4.10 – Trajectórias de tensões totais do ponto B – 80.HS	62
Figura 4.11 – Trajectórias de tensões totais do ponto C – 80.HS	63
Figura 4.12 – Trajectórias de tensões totais do ponto D – 80.HS	63

Figura 4.13 – Tensão horizontal das regiões A e B – 80.HS.SF	64
Figura 4.14 – Tensão horizontal das regiões C e D – 80.HS.SF	64
Figura 4.15 – Pressões de terra atrás da cortina – 80.HS.....	65
Figura 4.16 – Curva tensão-deformação do ponto C – 80.HS.SF	66
Figura 4.17 – Curva tensão-deformação do ponto D – 80.HS.SF	66
Figura 4.18 – Esforços nas escoras – 80.HS.NF	67
Figura 4.19 – Esforços nas escoras – 80.HS.SF	67
Figura 4.20 – Diagrama de pressões aparentes – 80.HS.....	68
Figura 4.21 – Envolventes dos momentos flectores – 80.HS	69
Figura 4.22 – Variação da redução do deslocamento em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – HS	70
Figura 4.23 – Variação da redução do assentamento da superfície em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação - HS	71
Figura 4.24 – Variação do esforço axial das escoras em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – HS	73
Figura 4.25 – Variação dos momentos flectores das cortinas em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – HS	74
Figura 4.26 – Resultado do ensaio triaxial de compressão 1 do estrato 3 (800c _u) - HS	75
Figura 5.1 – Diagrama carga-deslocamento de uma escora – a) real; b) modelado	80
Figura 5.2 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.ENL20/40.....	82
Figura 5.3 – Deslocamentos horizontais finais da cortina – 80.ENL20/40	83
Figura 5.4 – Esforços nas escoras – 80.ENL20/40.....	84
Figura 5.5 – Esforço axial do primeiro nível de escoramento – 80.ENL20/40.....	84
Figura 5.6 – Esforço axial do segundo nível de escoramento – 80.ENL20/40.....	85
Figura 5.7 – Esforço axial do terceiro nível de escoramento – 80.ENL20/40.....	85
Figura 5.8 – Esforço axial do quarto nível de escoramento – 80.ENL20/40	85
Figura 5.9 – Esforço axial do quinto nível de escoramento – 80.ENL20/40	86
Figura 5.10 – Esforço axial versus variação do comprimento do primeiro nível de escoramento – 80.ENL20/40.....	87
Figura 5.11 – Esforço axial versus variação do comprimento do segundo nível de escoramento – 80.ENL20/40.....	87
Figura 5.12 – Esforço axial versus variação do comprimento do terceiro nível de escoramento – 80.ENL20/40.....	87
Figura 5.13 – Esforço axial versus variação do comprimento do quarto nível de escoramento – 80.ENL20/40.....	88
Figura 5.14 – Esforço axial versus variação do comprimento do quinto nível de escoramento – 80.ENL20/40.....	88
Figura 5.15 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.ENL12/48.....	89
Figura 5.16 – Deslocamentos horizontais finais da cortina – 80.ENL12/48	90
Figura 5.17 – Esforços nas escoras – 80.ENL12/48.....	91
Figura 5.18 – Esforço axial do primeiro nível de escoramento – 80.ENL12/48.....	91
Figura 5.19 – Esforço axial do segundo nível de escoramento – 80.ENL12/48	92
Figura 5.20 – Esforço axial do terceiro nível de escoramento – 80.ENL12/48.....	92
Figura 5.21 – Esforço axial do quarto nível de escoramento – 80.ENL12/48	92
Figura 5.22 – Esforço axial do quinto nível de escoramento – 80.ENL12/48	93
Figura 5.23 – Esforço axial versus variação do comprimento do primeiro nível de escoramento – 80.ENL12/48.....	93

Figura 5.24 – Esforço axial versus variação do comprimento do segundo nível de escoramento – 80.ENL12/48.....	94
Figura 5.25 – Esforço axial versus variação do comprimento do terceiro nível de escoramento – 80.ENL12/48.....	94
Figura 5.26 – Esforço axial versus variação do comprimento do quarto nível de escoramento – 80.ENL12/48.....	94
Figura 5.27 – Esforço axial versus variação do comprimento do quinto nível de escoramento – 80.ENL12/48.....	95
Figura 5.28 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.ENL20/80	96
Figura 5.29 – Esforços nas escoras – 80.ENL20/80	97
Figura 5.30 – Esforço axial versus variação do comprimento do primeiro nível de escoramento – 80.ENL20/80.....	97
Figura 5.31 – Esforço axial versus variação do comprimento do segundo nível de escoramento – 80.ENL20/80.....	98
Figura 5.32 – Esforço axial versus variação do comprimento do terceiro nível de escoramento – 80.ENL20/80.....	98
Figura 5.33 – Esforço axial versus variação do comprimento do quarto nível de escoramento – 80.ENL20/80.....	98
Figura 5.34 – Esforço axial versus variação do comprimento do quinto nível de escoramento – 80.ENL20/80.....	99
Figura 5.35 – Representação gráfica dos coeficientes do Quadro 5.3	100

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 3.1 – Características mecânicas do maciço (Mateus Brito et al., 2006)	20
Quadro 3.2 – Rigidez axial e de flexão da parede moldada	21
Quadro 3.3 – Rigidez axial das escoras	21
Quadro 3.4 – Valores máximos dos momentos flectores – 80.EP	43
Quadro 3.5 – Resumo dos deslocamentos horizontais da cortina do lado direito – EP (valores em mm)	44
Quadro 3.6 – Resumo dos assentamentos da superfície do lado direito – EP (valores em mm)	45
Quadro 3.7 – Esforços máximos nas escoras na escavação não subfaseada – EP (valores em kN/m)	46
Quadro 3.8 – Esforços máximos nas escoras para a escavação subfaseada – EP (valores em kN/m)	46
Quadro 3.9 – Valores máximos dos momentos flectores – EP (valores em kNm/m)	47
Quadro 3.10 – Parâmetros de entrada no modelo com $800c_u$ – EP	48
Quadro 3.11 – Resumo dos resultados da escavação no solo com rigidez $800c_u$ – 80.EP	49
Quadro 3.12 – Resumo dos resultados da escavação com pré-esforço convencional nas escoras – 80.EP	49
Quadro 4.1 – Parâmetros de entrada no modelo linear ($400c_u$)	54
Quadro 4.2 – Parâmetros de entrada no modelo <i>hardening soil</i> ($400c_u$)	54
Quadro 4.3 – Resultados da modelação dos ensaios triaxiais de compressão 1 ($400c_u$)	55
Quadro 4.4 – Resultados da modelação dos ensaios triaxiais de compressão 2 ($400c_u$)	56
Quadro 4.5 – Resultados da modelação dos ensaios triaxiais de extensão 3 ($400c_u$)	57
Quadro 4.6 – Resultados da modelação dos ensaios triaxiais de extensão 4 ($400c_u$)	57
Quadro 4.7 - Valores máximos dos momentos flectores – 80.HS (valores em kNm/m)	69
Quadro 4.8 – Resumo dos deslocamentos horizontais da cortina – HS (valores em mm)	70
Quadro 4.9 – Resumo dos assentamentos da superfície – HS (valores em mm)	71
Quadro 4.10 – Esforços máximos nas escoras – 80.HS.NF (valores em kN/m)	72
Quadro 4.11 – Esforços máximos nas escoras – 80.HS.SF (valores em kN/m)	72
Quadro 4.12 – Valores máximos dos momentos flectores da cortina do lado esquerdo – HS (valores em kNm/m)	73
Quadro 4.13 – Parâmetros de entrada no modelo <i>hardening soil</i> com $800c_u$ - HS	74
Quadro 4.14 – Resultados da modelação dos ensaios triaxiais de compressão 1 ($800c_u$) - HS	75
Quadro 4.15 – Resumo dos resultados da escavação não faseada com rigidez $800c_u$ – 80.HS	76
Quadro 4.16 – Resumo dos resultados da escavação com pré-esforço convencional nas escoras – 80.HS	77
Quadro 5.1 – Escoras não lineares – Rigidez axial das escoras	81
Quadro 5.2 – Resumo dos movimentos associados às escavações do capítulo 4	81
Quadro 5.3 – Resumo dos deslocamentos horizontais máximos da cortina para as escavações dos capítulos 3 e 4	99
Quadro 5.4 – Coeficiente entre os deslocamentos máximos da cortina do lado direito e esquerdo para as escavações subfaseadas com largura de 80 m	101

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Letras Latinas

A – área da secção

c_u – resistência não drenada

E_{50} – módulo de deformabilidade secante

E_i – módulo de deformabilidade

E_{oed} – módulo de deformabilidade edométrico

E_{ur} – módulo de deformabilidade de descarga-recarga

h – profundidade de escavação

K_0 – coeficiente de impulso

N – carga de compressão

R_{int} – coeficiente de resistência da interface solo-estrutura

T – carga de tracção

Letras Gregas

γ – peso volúmico

σ – tensão normal

ν – coeficiente de Poisson

ϕ – ângulo de atrito

ψ – ângulo de dilatação

Abreviaturas

ENL12/48 – modelo constitutivo *hardening soil* e escoras com comportamento não linear, com rigidez inicial 12% e final 48% da rigidez teórica

ENL20/40 – modelo constitutivo *hardening soil* e escoras com comportamento não linear, com rigidez inicial 20% e final 40% da rigidez teórica

ENL20/80 – modelo constitutivo *hardening soil* e escoras com comportamento não linear, com rigidez inicial 20% e final 80% da rigidez teórica

EP – modelo constitutivo elástico-perfeitamente plástico

HS – modelo constitutivo *hardening soil*

NF – escavação não subfaseada

PE – pré-esforço

SF – escavação subfaseada

INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A maior parte da população mundial concentra-se em grandes centros urbanos. Esta concentração requer a construção de grandes obras em pequenas áreas, obrigando a um aproveitamento mais eficiente da área disponível. A saturação do espaço superficial impõe cada vez mais a utilização do subsolo, tanto para estacionamento automóvel como para vias de comunicação, entre os quais túneis rodoviários e ferroviários e linhas e estações de metropolitano.

Devido às áreas muito limitadas e condicionadas, as escavações têm de ser efectuadas, quase obrigatoriamente, com face vertical, exigindo uma estrutura de contenção flexível, e na proximidade de edifícios sensíveis a deslocamentos. Sendo muitos destes centros urbanos situados em zonas costeiras ou em margens de grandes rios, onde o solo tem um comportamento de solo mole, é tecnicamente desaconselhável a utilização de ancoragens nestas estruturas. Assim, é necessário desenvolver estruturas constituídas por cortinas apoiadas em vários níveis de escoras.

Sendo este o método mais antigo para o suporte de estruturas de contenção de terras, apresenta algumas desvantagens em relação às ancoragens. Para além da estrutura implicar uma escavação mais lenta e dispendiosa que tem de ser efectuada entre as escoras, apresenta um custo do próprio escoramento relativamente elevado, quer em material como em mão-de-obra.

No entanto, algumas situações particulares podem tornar esta estrutura numa solução favorável:

- existência de infra-estruturas enterradas próximas da escavação, que não permitem o recurso a ancoragens;
- existência de formações adequadas para a selagem dos bolbos de ancoragens apenas a grandes profundidades;
- possibilidade de incorporar na estrutura definitiva as escoras em vigas ou lajes.

Como foi anteriormente descrito, as escavações escoradas são maioritariamente efectuadas em ambientes urbanos, existindo na sua vizinhança edifícios ou infra-estruturas sensíveis a deslocamentos. Assim, o projectista deverá assegurar que a estabilidade da escavação é garantida, ou seja, que não se verifique um estado limite último, e que estão controlados os movimentos associados a essa escavação de forma a acautelar nas estruturas vizinhas o estado limite de utilização.

1.2. OBJECTIVO

Sendo o pré-esforço dos apoios da cortina (escoras ou ancoragens) de grande importância na redução dos deslocamentos, com este trabalho estudam-se estruturas escoradas nas quais o pré-esforço é aplicado através do subfaseamento da escavação. O subfaseamento consiste, em cada fase de escavação, na remoção de terras apenas de um dos lados da escavação para que o deslocamento da cortina desse lado aplique um esforço na escora que irá funcionar como pré-esforço para o lado oposto, antes de se escavar deste lado. Na Figura 1.1 é mostrado um exemplo do subfaseamento de uma escavação escorada em que do lado direito está uma estrutura sensível a movimentos do maciço.

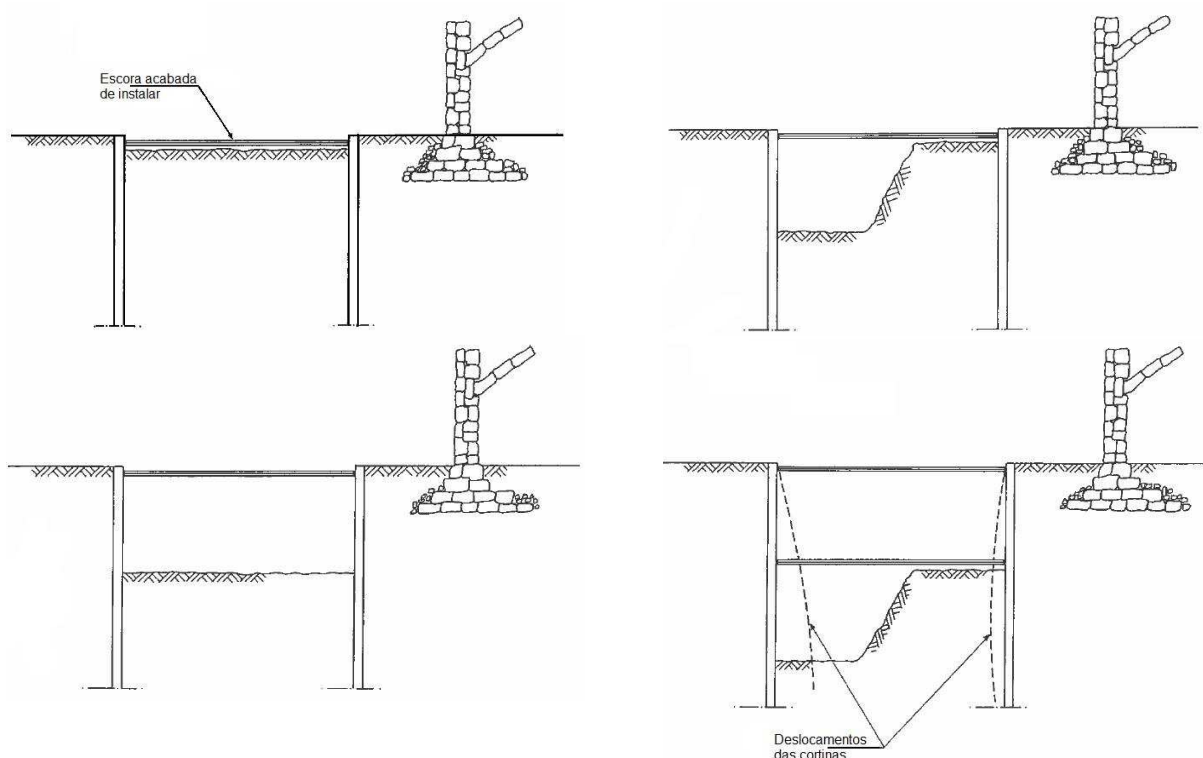


Figura 1.1 – Esquema do pré-esforço das escoras através do faseamento da escavação (Matos Fernandes)

Assim, pretende-se estudar a influência que o subfaseamento de uma escavação pode ter nos deslocamentos da cortina de contenção, que estão relacionados com os deslocamentos do maciço e afectam as estruturas vizinhas.

O tema desperta interesse uma vez que o subfaseamento da escavação pode não acarretar custos adicionais à obra e melhorar o comportamento da estrutura de contenção.

1.3. ÂMBITO

O presente trabalho centrar-se-á em cortinas apoiadas em vários níveis de escoras, executadas em solos moles. Serão consideradas cortinas constituídas por paredes moldadas.

O programa de cálculo utilizado nas diversas modelações foi o PLAXIS® versão 8.2.

Apresenta-se de seguida um sumário de cada um dos restantes capítulos da dissertação.

No capítulo 2 é feita uma breve referência à importância que o pré-esforço tem em estruturas de suporte escavações, as diferenças entre escoras e ancoragens relativamente à variação de rigidez destes elementos ao longo do carregamento, a conveniência em pré-esforçar ancoragens e escoras e os vários sistemas de aplicação de pré-esforço em escoras.

No capítulo 3 define-se as características do maciço onde está inserida a escavação a estudar e da estrutura de contenção e é apresentado o faseamento da escavação. Realiza-se a modelação de duas escavações com faseamentos diferentes no mesmo maciço, em que se utiliza um modelo de solo elástico-perfeitamente plástico. Estas duas escavações são depois comparadas de forma a avaliar as vantagens e desvantagens do subfaseamento da escavação. São efectuados mais dois cálculos: no primeiro, o solo onde está inserida a escavação tem uma rigidez maior; no segundo, é aplicado o pré-esforço convencional juntamente com o pré-esforço provocado pelo subfaseamento da escavação.

No capítulo 4 a estrutura é reanalisada utilizando um modelo constitutivo em que a rigidez do solo depende da trajectória de tensões (modelo *hardening soil*). Inicialmente é feita uma breve descrição do modelo utilizado e são modelados ensaios triaxiais de forma a permitir comparar as características deste modelo com as do modelo utilizado no capítulo 3. De seguida são analisados os resultados obtidos. Tal como no capítulo 3, também neste capítulo é verificada a influência da aplicação de pré-esforço através do subfaseamento da escavação.

No capítulo 5 é novamente analisada a mesma escavação mas agora considerando as escoras com comportamento não linear. Considera-se que na primeira subfase da escavação imediatamente após a instalação da escora a sua rigidez é menor e para as restantes subfases a rigidez da escora é maior. Com esta última análise prevê-se obter resultados mais próximos da realidade.

2

IMPORTÂNCIA DO PRÉ-ESFORÇO

2.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O pré-esforço dos apoios estruturais (escoras ou ancoragens) de uma cortina de contenção de uma escavação, para além da reposição dos deslocamentos sofridos pela cortina devido à escavação, prepara o restante maciço para as fases seguintes da escavação fazendo com que este sofra menores deformações. A aplicação do pré-esforço nas várias fases de escavação visa restaurar a acção da massa de solo retirado, repondo o estado de tensão modificado pelas fases de escavação precedentes.

Na execução de uma escavação a cortina de suporte deslocar-se-á para o interior da escavação. Este deslocamento provoca tensões do tipo activo atrás da cortina. Uma vez que a tensão vertical se mantém constante, a redução da tensão horizontal no solo atrás da cortina leva a um aumento da tensão de corte deste e, conseqüentemente, ao aumento da deformabilidade do maciço.

A aplicação de forças na cortina, provenientes das ancoragens ou escoras, contra o maciço repõe parcial ou totalmente a tensão horizontal no maciço suportado o que leva à diminuição da tensão de corte, diminuindo assim a deformabilidade do maciço. Com este efeito consegue-se ter uma redução da deformação da cortina e da superfície do maciço remanescente, juntamente com alguma recuperação dos deslocamentos sofridos.

A deformação da cortina devido às fases seguintes da escavação está relacionada com as tensões instaladas no solo a escavar. Assim, quanto maiores forem as tensões no solo maiores serão as deformações da cortina devido à escavação deste.

Considerando que o sistema está em equilíbrio estático, quando se executa mais uma fase de escavação, é possível representar o seu efeito pela aplicação de forças de sinal contrário às tensões do solo escavado.

Na Figura 2.1a mostra-se a força exercida pelo solo a ser escavado contra a cortina e o que virá a ser o fundo de escavação. Na figura 2.1b mostra as forças que são libertadas da cortina e do solo remanescente quando o anterior é escavado. Estas forças são simétricas em relação às representadas na figura 2.1a.

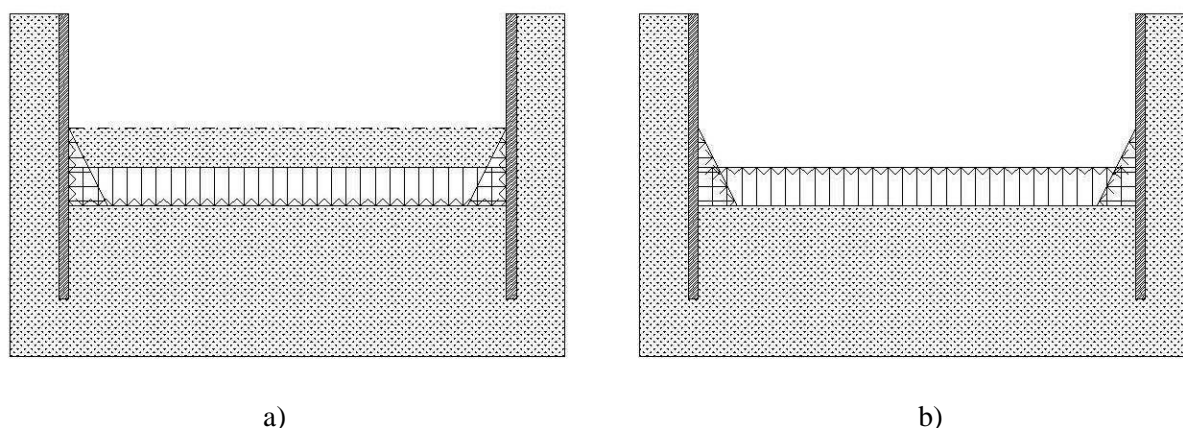


Figura 2.1 – Tensões no solo a escavar: a) antes; b) depois

Estas forças aplicadas à cortina e ao fundo de escavação obrigam à deformação destes de forma a atingir de novo o equilíbrio estático. Quanto maior for o deslocamento da cortina numa determinada fase, maiores serão as tensões entre a cortina e massa de solo e quanto maiores forem as tensões no solo a escavar maiores serão os deslocamentos da cortina associados à fase seguinte de escavação.

Numa escavação, o deslocamento da cortina para o interior provoca tensões do tipo passivo na frente da cortina, ou seja, o solo a escavar nas fases seguintes está sujeito a tensões superiores às tensões de repouso e, consequentemente, a fase de escavação seguinte provocaria maiores deslocamentos na cortina. No entanto, a aplicação de forças na cortina contra o maciço, como estruturas com pré-esforço, desloca a cortina nessa direcção reduzindo as tensões do tipo passivo. Logo, as forças associadas à retirada do solo serão menores e consequentemente menores os deslocamentos da cortina na fase seguinte da escavação. Deste modo, o pré-esforço em estruturas de suporte de terras permite preparar o solo para que na fase seguinte da escavação os deslocamentos no maciço sejam menores. É ainda compreensível que este fenómeno tende não só a repetir-se mas a ampliar-se nas fases seguintes, uma vez que quando uma delas inicia a diferença de deslocamento é maior do que na fase anterior.

Resumindo, a utilização do pré-esforço em estruturas de contenção de terras, sejam ancoradas ou escoradas, tem uma contribuição significativa na redução dos movimentos da cortina, não só nos deslocamentos que são recuperados mas também pela forma como condiciona favoravelmente o comportamento do sistema nas fases seguintes da escavação. Por consequência, os movimentos do maciço suportado são também menores, reduzindo assim o impacto da escavação na vizinhança.

2.2. PRÉ-ESFORÇO EM ANCORAGENS

Analisando-se um escavação suportada por uma cortina ancorada procurou-se avaliar o efeito do pré-esforço das ancoragens (Matos Fernandes, 1983). O caso escolhido é uma escavação simétrica num estrato de argila mole, com 15 m de possança e nível freático à superfície, como mostra a Figura 2.2. A estrutura de suporte é constituída por uma cortina de parede moldada de 0,6 m de espessura, encastrada no firme e ancorada às profundidades de 2,0 m, 4,6 m e 7,3 m. As ancoragens são inclinadas de 45° e espaçadas na horizontal de 2,7 m e admitem-se seladas na formação resistente abaixo do estrato escavado.

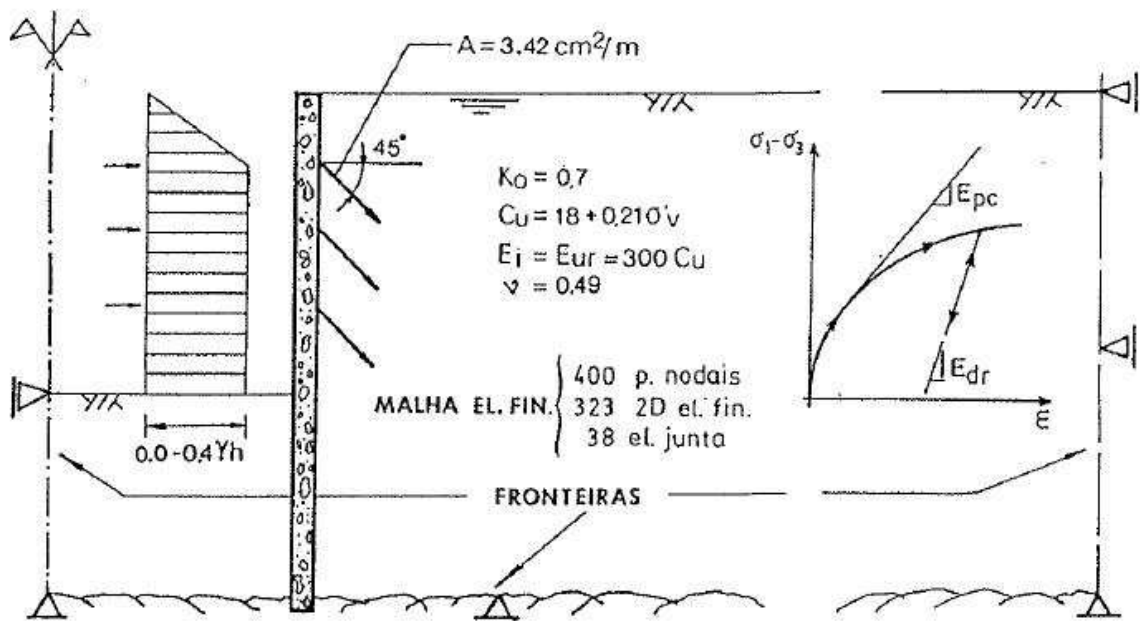


Figura 2.2 – Escavação em argila suportada por uma cortina ancorada. Exemplo para estudo pelo m.e.f do efeito dos pré-esforços das ancoragens (Matos Fernandes, 1983)

O estudo foi realizado em tensões totais com o modelo hiperbólico de Duncan e Chang (1970) com os parâmetros indicados na figura. Considerando o pré-esforço nas ancoragens nulo, obtiveram-se os resultados na Figura 2.3, os quais incluem os deslocamentos da cortina, assentamentos da superfície, pressões de terra atrás da cortina e diagrama de pressões aparentes.

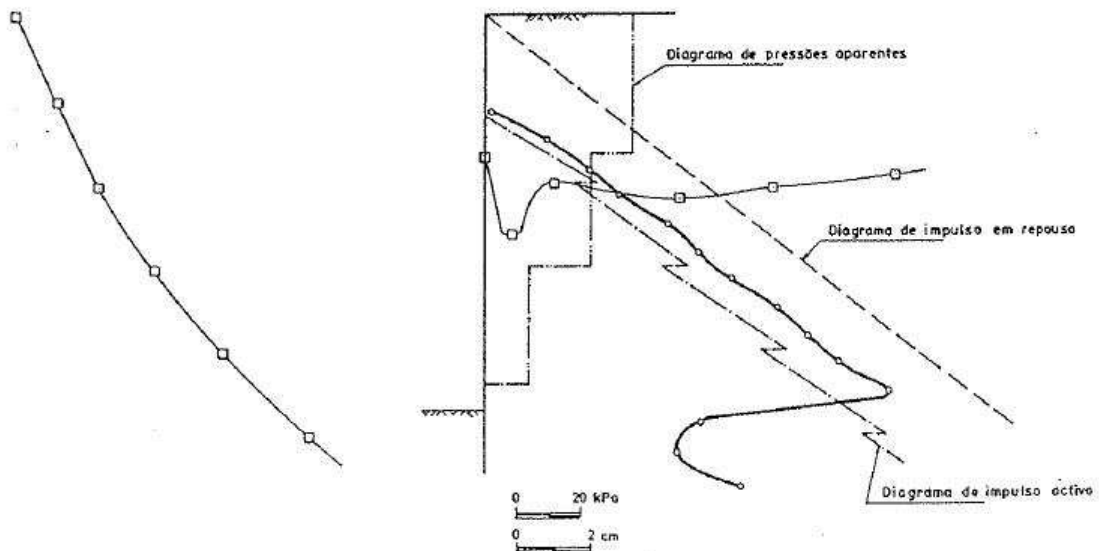


Figura 2.3 – Resultados para a condição de pré-esforço nulo nas ancoragens (Matos Fernandes, 1983)

O deslocamento da cortina é próximo de uma rotação em torno do pé dirigido para a escavação, sendo o deslocamento no topo elevado, e por isso o diagrama de pressões de terra é próximo do diagrama de pressões activas de Rankine.

Este movimento é explicado porque a rigidez axial das ancoragens é muito reduzida e assim, após serem colocadas, não mobilizam elevadas reacções que detenham os deslocamentos da cortina nos pontos de amarração quando se deformam.

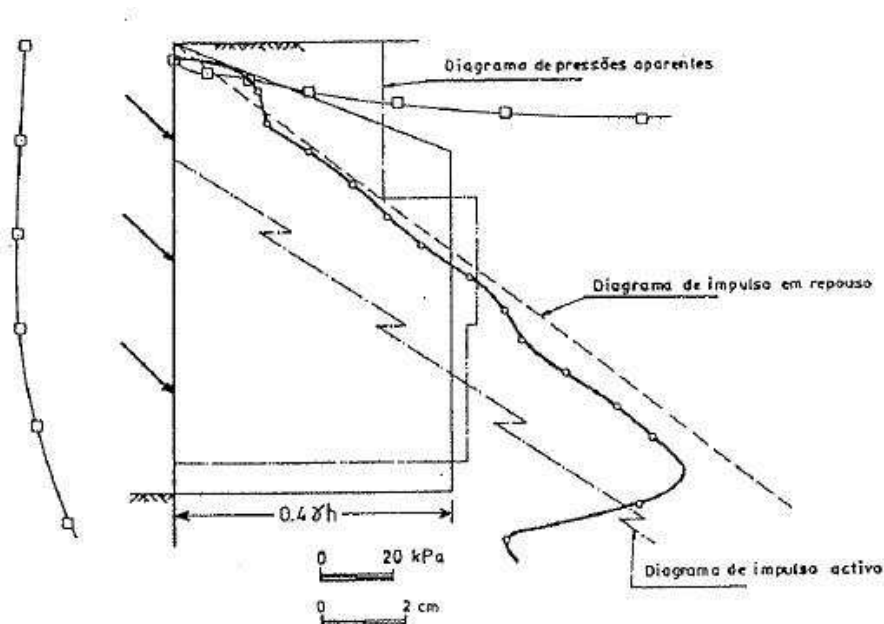


Figura 2.4 – Resultados para a condição de pré-esforço nas ancoragens com base do diagrama representado (Matos Fernandes, 1983)

A Figura 2.4 é o resultado da simulação considerando pré-esforço nas ancoragens com base num diagrama trapezoidal também indicado na figura.

Comparando ambas as figuras, é possível ver que o efeito do pré-esforço nas ancoragens é muito acentuado, tanto nos deslocamentos da cortina e pressões de terra.

Para aprofundar este assunto, observe-se a Figura 2.5 que mostra o desenvolvimento ao longo da escavação dos deslocamentos do ponto de amarração do segundo nível de ancoragens nos cálculos anteriores. Na figura mostra-se as contribuições para a diferença dos dois deslocamentos finais de, por um lado, a diferença associada às fases de escavação e, por outro, ao pré-esforço.

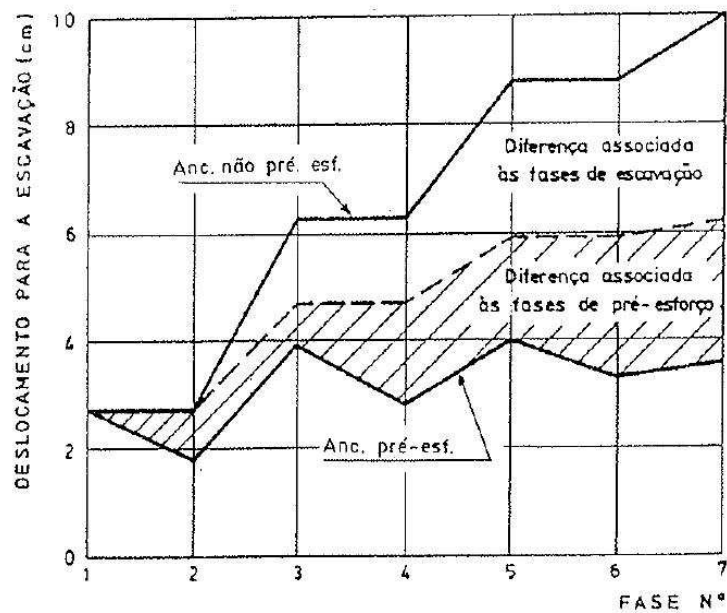


Figura 2.5 – Evolução dos deslocamentos da cabeça do 2º nível de ancoragens nos dois cálculos anteriores (Matos Fernandes, 1983)

A diferença associada às fases de pré-esforço resulta da recuperação parcial dos deslocamentos devido à força aplicada sobre a parede para o pré-esforço das ancoragens, e por isso esta se desloca no sentido do maciço suportado.

A diferença associada às fases de escavação está relacionada com o efeito do pré-esforço no maciço suportado e no solo ainda a ser escavado. Como foi visto anteriormente, a retirada do solo pode ser representada pela aplicação na fronteira que separa a massa a escavar do restante maciço e da cortina de forças dirigidas para a escavação equivalentes às tensões existentes nessa fronteira imediatamente antes da escavação. Assim, quanto maior for o deslocamento da cortina numa dada fase, maiores serão as tensões do tipo passivo no solo a escavar. Por consequência, serão maiores as forças aplicadas, voltadas para escavação, que corresponderão à retirada do solo na fase seguinte.

Um outro aspecto que contribui para a redução dos deslocamentos da cortina devido ao pré-esforço dos apoios centra-se no facto de que este tende a atenuar os incrementos de tensões de corte no maciço de ambos os lados da cortina resultantes das fases anteriores da escavação. No maciço suportado, as trajectórias de tensão associadas às fases de escavação são quase simétricas das trajectórias associadas às fases de pré-esforço. Assim, quando o pré-esforço nas ancoragens é adequadamente estabelecido, resulta em estados de tensão no maciço antes e depois da escavação bastante próximos. Tal é visível na Figura 2.6 que mostra a trajectória de tensões de um dos elementos da escavação estudada.

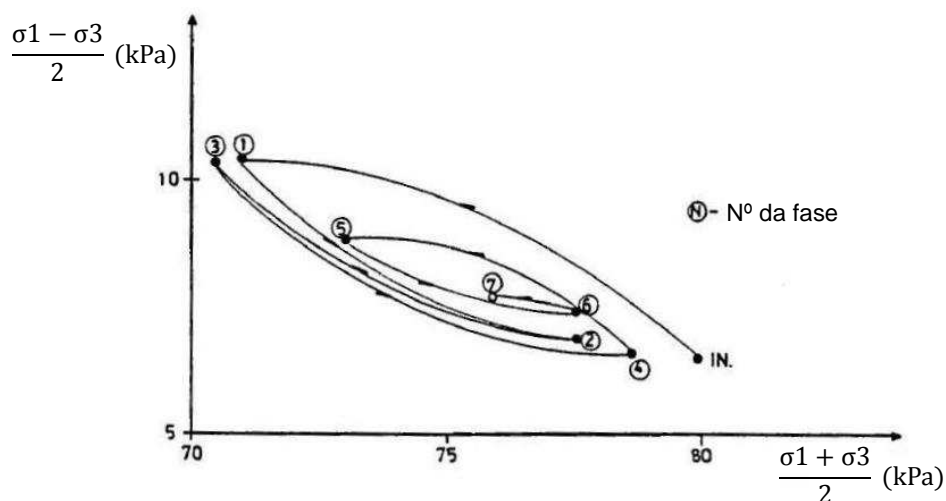


Figura 2.6 – Trajectória de tensões de um elemento do maciço suportado da escavação da Figura 2.4 (Matos Fernandes, 1983)

Assim, se as tensões distorcionais do maciço permanecerem em valores modestos ou moderados, a deformabilidade do maciço será relativamente baixa.

Concluindo, sendo menores as forças aplicadas à cortina e menor a deformabilidade do maciço nas fases em que se aplica níveis de pré-esforço elevado, os deslocamentos serão significativamente menores. Assim, a adopção de pré-esforços nas ancoragens é fundamental não só pela recuperação dos deslocamentos devido à sua aplicação, mas também pela forma como esta condiciona favoravelmente o comportamento da estrutura nas fases seguintes da escavação.

2.3. ESCORAS OU ANCORAGENS?

Os efeitos benéficos explicados no subcapítulo anterior para as ancoragens também são aplicáveis caso os apoios sejam escoras. No entanto, nas escoras há ainda um factor muito relevante relativamente ao pré-esforço que passa a ser explicado a seguir.

No caso de ancoragens, a rigidez efectiva diminui com o aumento da tensão a que estão sujeitas, ou seja, quanto maior for a tensão instalada no elemento maior será a variação do deslocamento para a mesma variação de tensão. A Figura 2.7 mostra a diminuição da rigidez efectiva da ancoragem com o aumento da tensão comparativamente à rigidez teórica. Esta diminuição deve-se ao facto de, para tensões elevadas na ancoragem, haver deslocamentos relativos do bolbo de selagem com o progressivo desprendimento deste, levando a uma diminuição da rigidez efectiva do elemento em relação à rigidez teórica.

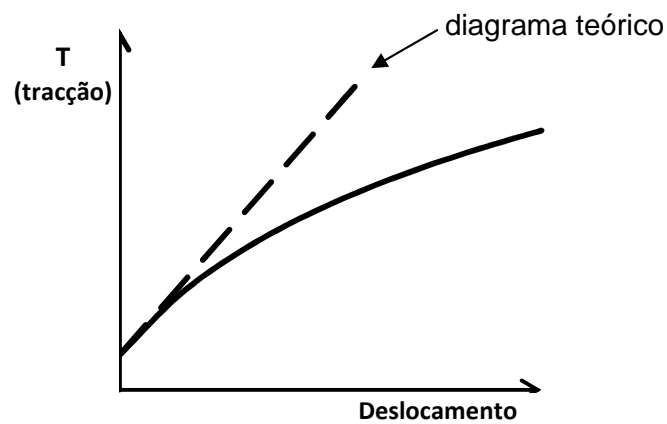


Figura 2.7 – Diagrama carga-deslocamento de uma ancoragem.

Nas escoras, pelo contrário, como mostra a Figura 2.8, a rigidez efectiva inicial do elemento é relativamente baixa devido às folgas que possam existir entre a escora e a cortina na sua colocação. No entanto, o aumento da tensão de compressão na escora elimina tais folgas e consequentemente a rigidez efectiva desta aproxima-se progressivamente da rigidez teórica.

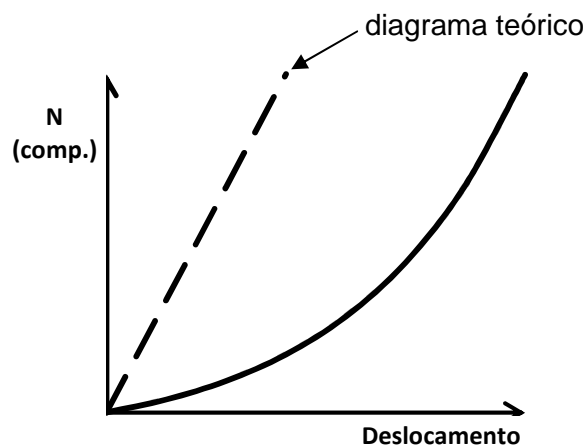


Figura 2.8 – Diagrama carga-deslocamento de uma escora.

Neste caso, a aplicação de pré-esforço visa anular as folgas existentes entre a escora e a cortina antes da escavação, levando assim a que a rigidez efectiva da escora no início da escavação seja mais próxima da rigidez teórica.

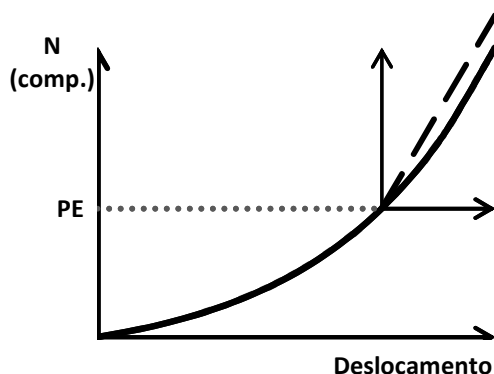


Figura 2.9 – Diagrama carga-deslocamento de uma escora pré-esforçada

O novo eixo representado na Figura 2.9 representa o diagrama de carga-deslocamento da escora pré-esforçada no início da escavação no caso de o pré-esforço aplicado à escora anular grande parte das folgas entre esta e a cortina. Neste exemplo constata-se que a rigidez efectiva da escora é muito próxima da rigidez teórica.

Concluindo, para além da recuperação dos deslocamentos ocorridos em fases anteriores e melhoramento do comportamento do maciço, o pré-esforço em escoras também permite reduzir as possíveis folgas entre estas e a cortina, fazendo com que as escoras se comportem com uma rigidez mais próxima da rigidez teórica.

2.4. COMO PODE SER FEITO O PRÉ-ESFORÇO EM ESCORAS?

2.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

A aplicação do pré-esforço em escoras pode ser efectuada com variados sistemas dependendo da tensão a aplicar e outras condicionantes da obra.

Alguns sistemas de pré-esforço permitem a sua aplicação num curto espaço de tempo, comparado com o tempo necessário à colocação das escoras, enquanto outros obrigam à sua manutenção em funcionamento nas fases seguintes à aplicação da escora (Perdigão, 1999).

2.4.2. SISTEMA TRADICIONAL DE PRÉ-ESFORÇO

O sistema tradicional de pré-esforço consiste na colocação de macacos hidráulicos numa das extremidades e comprimir a escora, como mostra a Figura 2.10, e antes do prosseguimento da escavação são instalados elementos de ajuste que permitem descarregar e retirar os macacos hidráulicos para poderem ser utilizados noutras escoras.

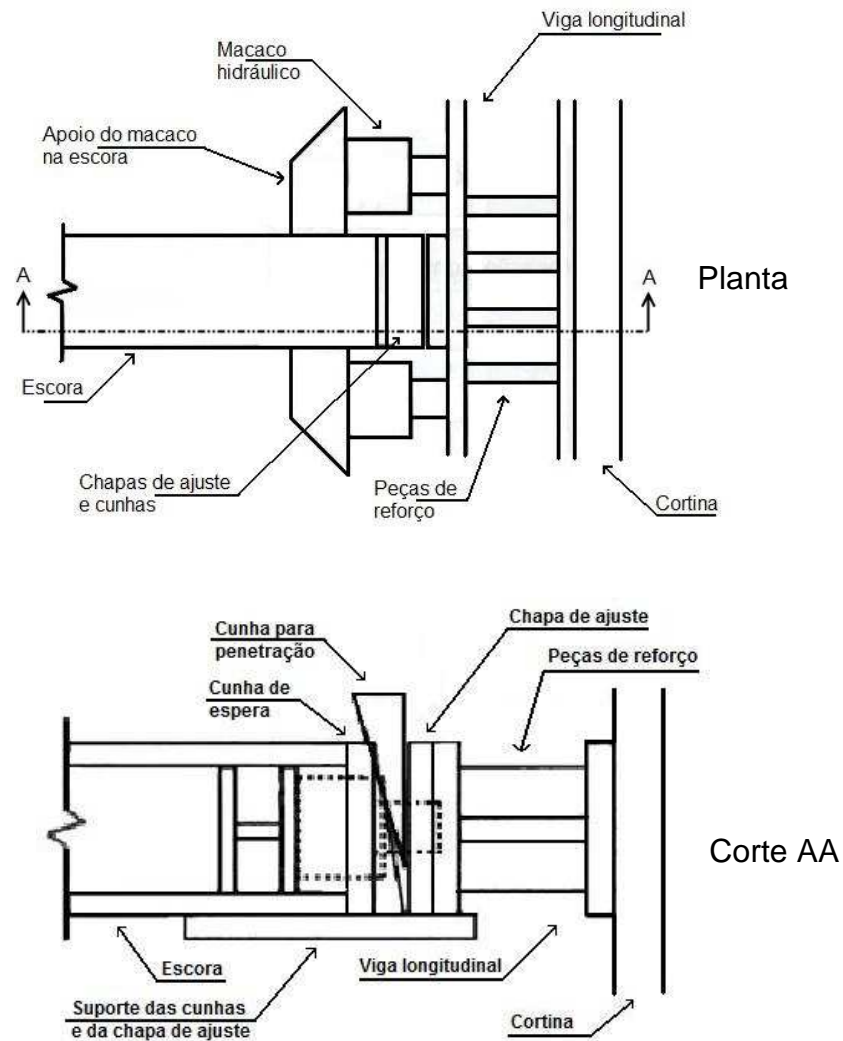


Figura 2.10 – Sistema tradicional de pré-esforço em escoras (adaptado de Perdigão, 1999)

Normalmente, este sistema apresenta as fases de montagem e de aplicação do pré-esforço que de um modo simplificado se apresentam:

- escavação até à profundidade onde se instalará a escora;
- colocação de vigas longitudinais (opcional);
- colocação da escora;
- aplicação de pré-esforço com macacos hidráulicos;
- colocação de elementos de ajuste;
- descarga dos macacos hidráulicos, retirada destes e prosseguimento da escavação.

A colocação das vigas é opcional. No entanto, a sua colocação é conveniente na medida que permite uma melhor distribuição das cargas das escoras para a cortina.

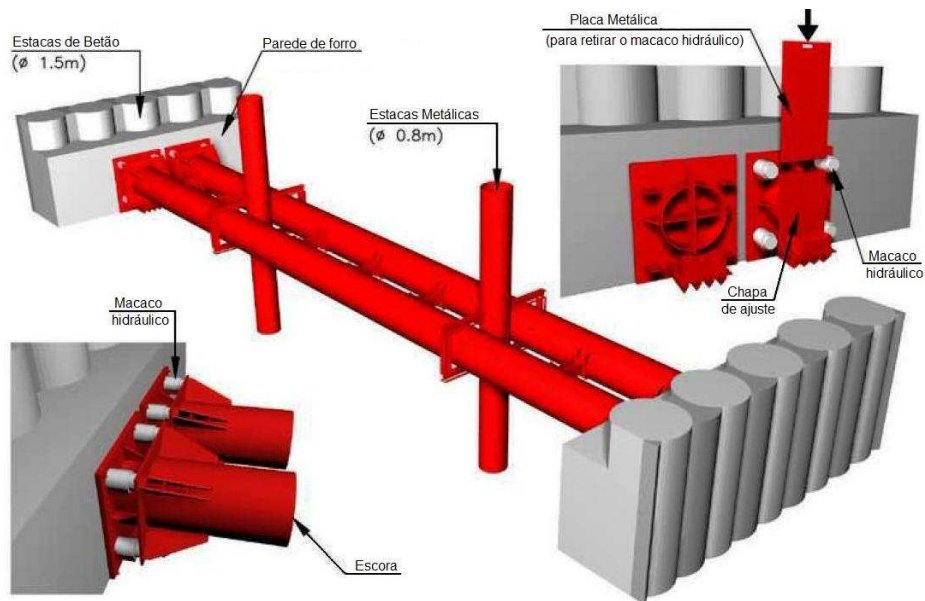


Figura 2.11 – Pormenor do escoramento (Mateus Brito, 2006)

Na Figura 2.11 apresenta-se o sistema de suporte utilizado na escavação efectuada para a escavação da Estação Terreiro do Paço do Metropolitano de Lisboa, em que o pré-esforço foi aplicado com o sistema tradicional.

A colocação de elementos de ajuste, como cunhas, é de relativa importância, uma vez que têm grande influência na rigidez da ligação. Uma colocação menos cuidada destes elementos pode significar grandes perdas de pré-esforço na retirada dos macacos hidráulicos, assim como uma diminuição da rigidez efectiva das escoras.

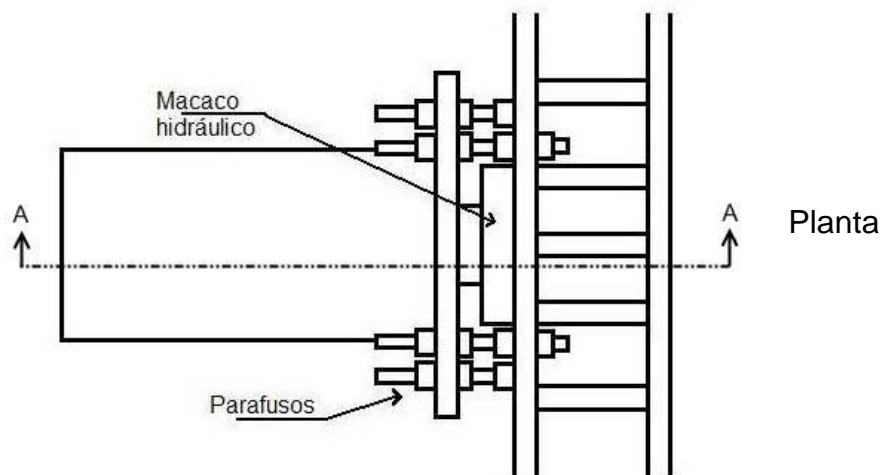


Figura 2.12a – Sistema tradicional com parafusos (adaptado de Perdigão, 1999)

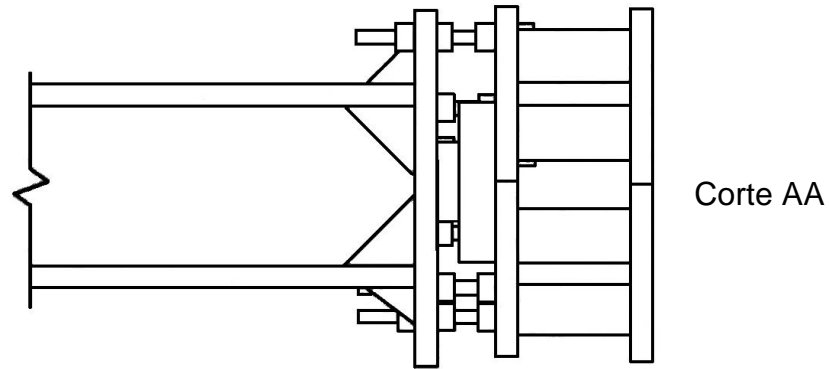


Figura 2.12b – Sistema tradicional com parafusos (adaptado de Perdigão, 1999)

Para minimizar estes efeitos é possível a utilização de elementos de dimensão ajustável. Tal é exequível com a utilização de parafusos ao invés de cunhas ou troços de escoras, como mostra a Figura 2.12.

Devido ao risco de encurvadura destes elementos, estes deverão ter um comprimento pequeno, o que pode obrigar ao uso de macacos planos. Caso a carga de pré-esforço seja concêntrica, deve ter-se em conta também que será necessário deixar espaço para retirar o macaco hidráulico. Por isso, o dimensionamento dos parafusos deve ter em conta que nesse momento não estarão todos os parafusos instalados para suportar a tensão instalada na escora (Perdigão, 1999).

2.4.3. PRÉ-ESFORÇO COM MANUTENÇÃO DOS MACACOS EM CARGA

Tal como o método anterior, em muitos dos sistemas de pré-esforço não é possível evitar perdas de carga associadas, por exemplo, aos elementos de ajuste, o que dificulta prever a carga final da escora.

Para resolver este problema é possível manter os macacos hidráulicos em carga até à instalação da escora seguinte ou até à retirada da própria escora, e assim controlar a carga da escora durante toda a construção ou, pelo menos, durante a fase mais crítica da escora em que a sua carga é máxima.

Uma vez que este método utiliza mais macacos hidráulicos que os restantes métodos, este apresenta custos mais elevados e por isso é menos utilizado. No entanto, pode-se mostrar vantajosa para casos com poucos níveis de escoras.

Para aplicar este sistema não é necessário utilizar os macacos hidráulicos convencionais, podem ser criados sistemas que funcionem como tal, por exemplo a utilização de líquidos incompressíveis, como água ou óleo, que apliquem pressão num êmbolo de forma a comprimir a escora.

Uma das vantagens deste método, a juntar à de não existirem perdas de carga, reside na possibilidade de controlar a carga da escora durante toda a escavação de forma a manter o esforço da escora próxima da carga de projecto (Perdigão, 1999).

2.4.4. PRÉ-ESFORÇO COM CABOS

Este método consiste na aplicação de pré-esforço na escora antes da sua colocação em obra. Em estaleiro, a escora é pré-comprimida com macacos hidráulicos e cabos de pré-esforço. A escora é depois colocada no local e posteriormente os cabos são relaxados e retirados para poderem ser utilizados em outras escoras.

Como poderá ser aplicado um pré-esforço superior à carga de encurvadura da escora, é necessário a instalação de uns elementos que apliquem uma deflexão nos cabos de pré-esforço, como mostra a Figura 2.13, aliado a uma distribuição da carga por todos os cabos de forma a confinar a escora e a prevenir a sua encurvadura.

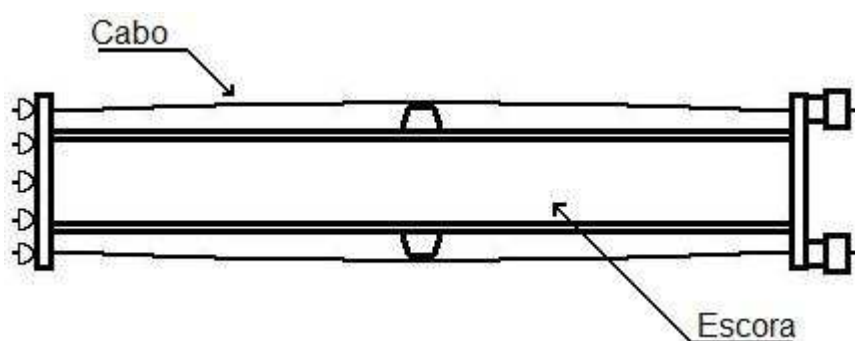


Figura 2.13 – Pré-esforço com cabos (adaptado de Perdigão, 1999)

É de lembrar que na colocação da escora é necessário deixar espaço para a retirada dos cabos. Os cabos podem ser relaxados e retirados sem recurso a macacos hidráulicos. No entanto, é necessário que estes estejam protegidos, dentro de tubos por exemplo, para evitar acidentes.

A principal vantagem deste método reside na rapidez de instalação da escora, não comprometendo significativamente os restantes trabalhos, uma vez que o pré-esforço é aplicado em estaleiro. A desvantagem está na perda de carga na retirada dos cabos, não sendo possível controlar a carga da escora (Perdigão, 1999).

2.4.5. TEMPERATURA

Como as variações diárias e anuais de temperatura afectam consideravelmente os esforços nas escoras, é de notar que o prévio arrefecimento da escora irá influenciar a carga nela instalada durante as restantes fases de escavação. Por isso, pode considerar-se o arrefecimento um pré-esforço da escora.

Este método poderá ser de difícil aplicação devido à dimensão das escoras. No entanto, é possível com a sua colocação em condições de temperatura ambiental inferiores como é o caso de períodos nocturnos. Outro método possível é o aquecimento das escoras e manter essa temperatura, mas também de difícil aplicação como o método anterior. No entanto, apresenta a vantagem de ser possível controlar a carga na escora controlando a sua temperatura (Perdigão, 1999).

2.4.6. PRÉ-ESFORÇO COM FASEAMENTO DA ESCAVAÇÃO

Um dos objectivos do suporte de terras é a redução da deformação do maciço de forma a não afectar estruturas vizinhas. No entanto, nem todas as estruturas têm a mesma sensibilidade. Assim, é possível iniciar a escavação do lado em que as estruturas são menos sensíveis e só depois o lado que tem estruturas mais sensíveis, como mostra a Figura 1.1.

O início da escavação de um dos lados irá provocar o deslocamento da cortina correspondente que provocará um determinado esforço axial na escora. Assim, quando se for escavar do lado mais sensível, a escora já tem uma determinada carga instalada que poderá funcionar como pré-esforço. Deste modo, a rigidez efectiva da escora no momento da escavação do lado mais sensível será maior do que a rigidez efectiva inicial.

Na Figura 2.14 é possível ver o esquema de um faseamento. Repare-se que após a colocação da escora se começa a escavar do lado esquerdo. O deslocamento da cortina derivado da escavação provoca um carregamento na escora. Este carregamento funcionará como pré-esforço da própria escora quando se escavar a restante massa de solo do lado direito. Pré-esforço esse que fará com que a cortina do lado direito sofra deslocamento menores, resultando em menores movimentos do terrapleno.

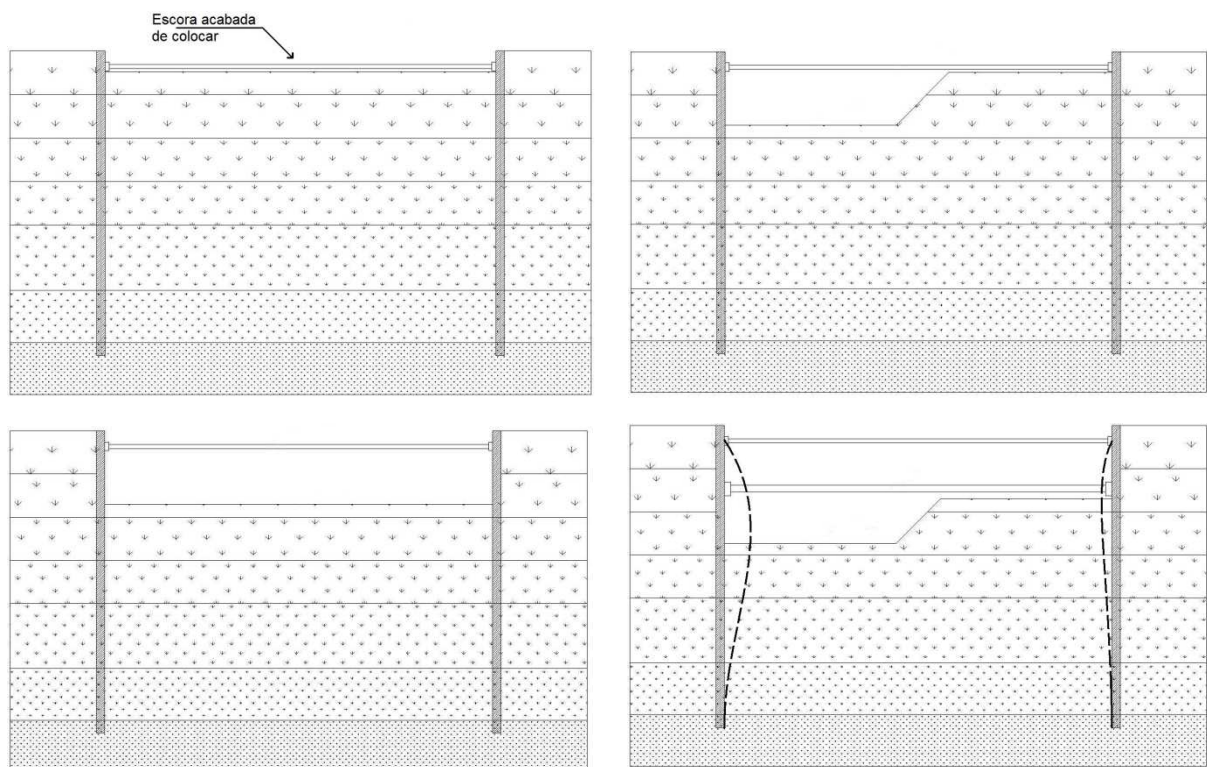


Figura 2.14 – Pré-esforço com subfaseamento da escavação

A vantagem deste método reside na possibilidade de pré-esforçar de uma forma simples e que poderá ser utilizada em conjunto com outro método já descrito.

Como já referido, o presente trabalho tem como estudo este sistema de pré-esforço e por isso será pormenorizado mais à frente.

3

ANÁLISES COM UM MODELO DE SOLO ELÁSTICO-PERFEITAMENTE PLÁSTICO

3.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo analisa-se o comportamento de uma cortina escorada em que é aplicado o pré-esforço por subfaseamento da escavação. Esta análise é feita com base nos resultados de modelações numéricas de uma estrutura de contenção escorada. Considerou-se as características do maciço no local da Estação Terreiro do Paço do Metropolitano de Lisboa.



Figura 3.1 – Início da escavação da Estação do Terreiro do Paço do Metropolitano de Lisboa

A escavação para a Estação Terreiro do Paço, representada na Figura 3.1, foi realizada em *cut-and-cover* com 25,5 metros de profundidade. Esta profundidade é próxima da profundidade das escavações estudadas.

Foram analisadas várias larguras de escavação de forma a avaliar este efeito no pré-esforço das escoras por subfaseamento da escavação.

O programa de cálculo automático utilizado foi o PLAXIS 2D®, versão 8.2, da empresa PLAXIS B.V..

3.2. APRESENTAÇÃO DO ESTUDO NUMÉRICO EFECTUADO

3.2.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Uma vez que este estudo envolve muitas simulações de escavações, todas as escavações são identificadas por um conjunto de três siglas separadas por um ponto. A primeira é a largura da escavação em metros, a segunda identifica o modelo constitutivo do solo e por último o tipo de escavação. O significado de cada sigla é dado quando é apresentada cada uma das características que identificam uma escavação. Em alguns casos, as escavações estarão identificadas apenas com duas siglas. Tal deve-se à figura ou quadro em questão representar mais do que uma escavação e assim a sigla identifica apenas as características que são comuns às escavações apresentadas.

Por exemplo, a sigla **80.EP.NF**, identifica a escavação com 80 m de largura, modelo elástico-perfeitamente plástico e escavação não subfaseada.

3.2.2. CARACTERÍSTICAS DO MACIÇO

Para o maciço foi admitido um comportamento elástico-perfeitamente plástico (EP) com o critério de Tresca, sendo a análise realizada em tensões totais.

As características mecânicas do maciço adoptado são as apresentadas no Quadro 3.1, que tiveram por base os estudos efectuados durante a realização do projecto da Estação Terreiro do Paço. O nível freático situa-se aproximadamente a 2 m de profundidade.

Os valores para a resistência não drenada dos aluviões argilosos moles foram obtidos de ensaios por corte rotativo (FVT) e ensaios triaxiais, os quais foram confrontados com resultados de ensaios CPTU. O valor para E_u considerou-se igual $400 c_u$, que é um valor admissível para os solos moles, e comprovado por ensaios *cross-hole* no local.

Para o substrato do Miocénico foram feitos ensaios triaxiais para a determinação dos valores de c_u e ensaios *cross-hole* para a determinação de E_u .

Quadro 3.1 – Características mecânicas do maciço (Mateus Brito et al., 2006)

Solo	Profundidade (m)	γ (kN/m ³)	K_0	C_u (kPa)	E_u (MPa)	ν_u
Aluviões argilosos	0-5	18	0,6	37	14,8	0,49
	5-10			37	14,8	
	10-15			45	18,0	
	15-20			54	21,6	
	20-27,5			62	24,8	
Substrato miocénico	27,5-33,5	21,5		300	150	
	33,5-50			400	500	

3.2.3. ESTRUTURA DE SUPORTE

A escavação estudada e as principais características estão representadas na Figura 3.2.

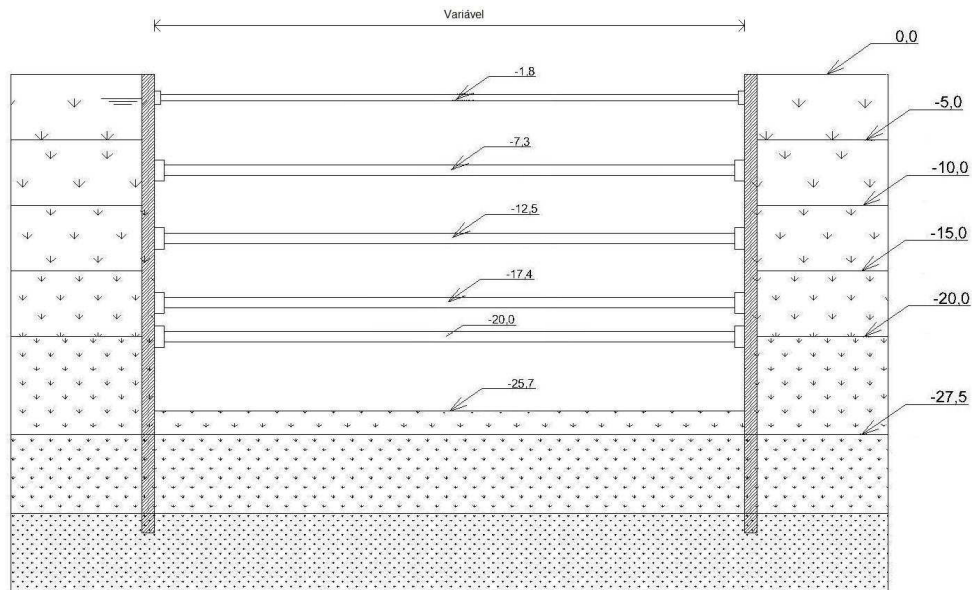


Figura 3.2 – Corte transversal da escavação analisada

Para suporte da escavação foi considerada uma parede moldada apoiada em escoras.

A parede moldada tem a espessura de 1 m e altura de 35 m, ficando com 9,3 m no estrato miocénico. O peso volumico da parede é de 25 kN/m^3 e o coeficiente de Poisson de 0,2.

Utilizou-se a ferramenta “Plate” no programa de cálculo para modelar a parede moldada, atribuindo-se a este elemento um comportamento linear elástico com um módulo de deformabilidade de 18 GPa. Uma vez que no programa se tem de indicar a rigidez axial e de flexão, estes valores foram calculados e apresentam-se no Quadro 3.2.

Quadro 3.2 – Rigidez axial e de flexão da parede moldada

E (GPa)	EA (MN/m)	EI (MN.m ² /m)
18	18000	1500

A cortina é suportada por cinco níveis de escoras de aço com um espaçamento médio de 3,5 m.

Admitiu-se que a rigidez axial efectiva das escoras vale 30% da rigidez teórica, o que resultou nos valores apresentados no Quadro 3.3 para os parâmetros de entrada no programa de cálculo. O módulo de deformabilidade do aço das escoras considerado foi de 200 GPa.

Quadro 3.3 – Rigidez axial das escoras

Nível	Perfil tubular (aço FE 430)	EA (MN)
1	φ609,6 - esp 14,2 mm	1593,6
2	φ711,2 - esp 16 mm	2096,4
3	φ711,2 - esp 17,5 mm	2294,4
4	φ711,2 - esp 25 mm	3233,4
5	φ711,2 - esp 16 mm	2096,4

As escoras foram simuladas com a ferramenta “node-to-node anchor”, com um comportamento elástico-perfeitamente plástico, com força de tracção máxima de zero. Foi dado um espaçamento longitudinal destes elementos de 3,5 m. Caso não haja informação em contrário, não é aplicado pré-esforço convencional às escoras.

Estando todos os elementos definidos é possível criar a malha para o cálculo por elementos finitos. No que diz respeito ao tipo de elementos utilizados, o PLAXIS® dispõe de elementos triangulares de 6 (a) ou 15 pontos nodais (b), ilustrados na Figura 3.3. Os elementos de 6 pontos nodais permitem uma interpolação de 2ª ordem para deslocamentos e de 3 pontos de Gauss para o cálculo de tensões, enquanto os elementos de 15 pontos nodais permitem uma interpolação de 4ª ordem para deslocamentos e 12 pontos de Gauss para o cálculo tensões.

Nas análises deste trabalho foram utilizados elementos triangulares de 15 pontos nodais.

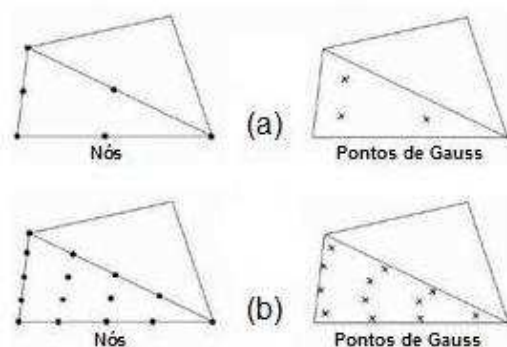


Figura 3.3 – Tipos de elementos do PLAXIS®: (a) 6 pontos nodais; (b) 15 pontos nodais

A malha para esta modelação foi criada com a opção “very fine” de forma a ter uma malha muito fina e com uma maior definição junto à parede moldada de forma a se obter melhores resultados sobre esta. Aos elementos de junta, representativos da interface entre a cortina e o maciço, foi atribuído um comportamento do mesmo tipo do solo. O valor adoptado, no programa, para o R_{inter} foi de 2/3, este valor significa a redução das características resistentes dos elementos de junta.

As condições fronteira impostas foram apoios duplos no limite inferior e apoios simples que não permitem o deslocamento horizontal nos limites laterais. A malha obtida e as condições fronteira podem ser observadas na Figura 3.4.

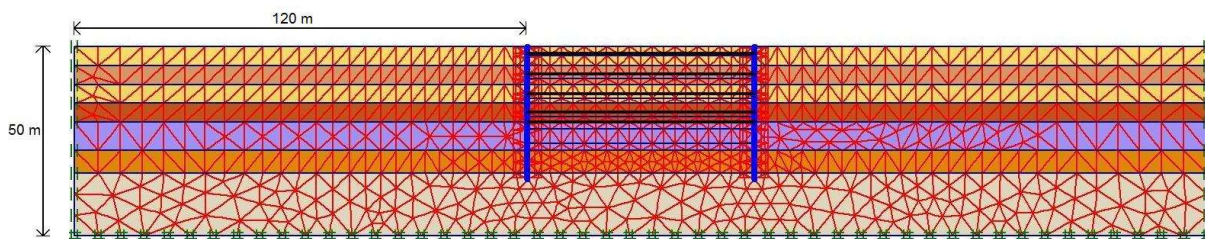


Figura 3.4 – Malha de elementos finitos e condições fronteira

Devido à investigação se focar no subfaseamento da escavação e, uma vez que em cada lado da escavação o solo é retirado em fases distintas, não é possível tirar partido das condições de simetria da escavação.

3.2.4. FASEAMENTO CONSTRUTIVO

3.2.4.1. Considerações gerais

Para poder fazer uma análise comparativa sobre o subfaseamento da escavação foi necessário comparar os resultados de escavações não subfaseadas e de escavações subfaseadas. De seguida apresentam-se os cálculos efectuados para cada uma das escavações e suas subfases.

É de referenciar que os deslocamentos foram anulados antes da fase 1 para que na análise dos resultados não se considerem os deslocamentos provocados pela criação do estado inicial de tensão nem da construção das cortinas de contenção.

3.2.4.2. Escavação não subfaseada (NF)

O não subfaseamento consiste em, para cada nível, fazer a escavação a toda a largura numa só fase, como é corrente.

Tem-se assim como principais fases:

- Fase 1 – Escavação até 2,4 m de profundidade;
- Fase 2 – Aplicação 1º nível de escoras e escavação até 8,5 m de profundidade;
- Fase 3 – Aplicação 2º nível de escoras e escavação até 13,7 m de profundidade;
- Fase 4 – Aplicação 3º nível de escoras e escavação até 18,6 m de profundidade;
- Fase 5 – Aplicação 4º nível de escoras e escavação até 21,7 m de profundidade;
- Fase 6 – Aplicação 5º nível de escoras e escavação até 25,7 m de profundidade.

Estas fases encontram-se representadas nas Figuras 3.5 a 3.10.

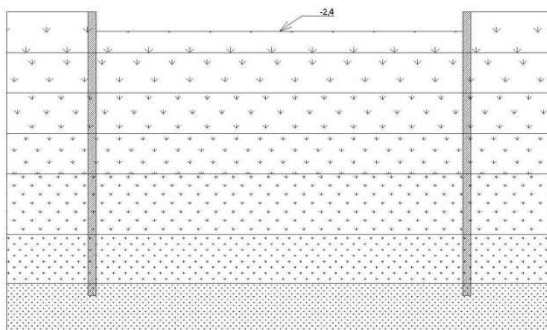


Figura 3.5 – Fase 1 da escavação não subfaseada

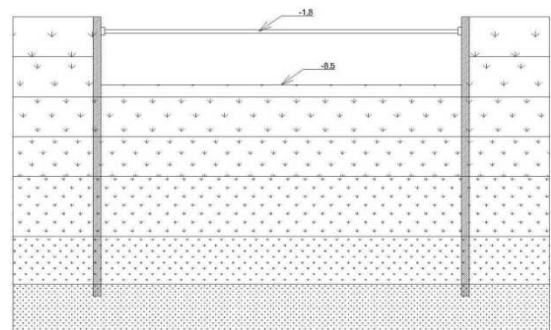


Figura 3.6 – Fase 2 da escavação não subfaseada

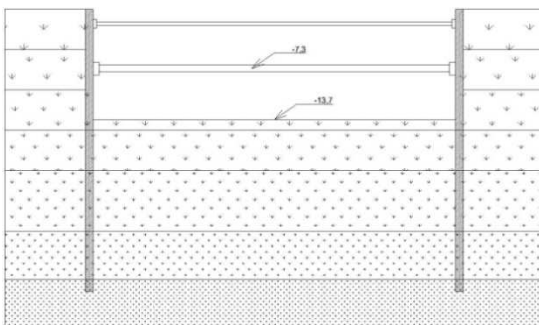


Figura 3.7 – Fase 3 da escavação não subfaseada

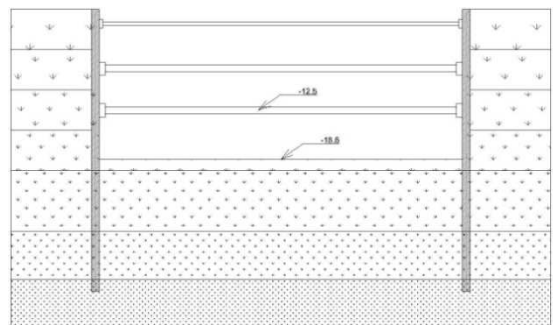


Figura 3.8 – Fase 4 da escavação não subfaseada

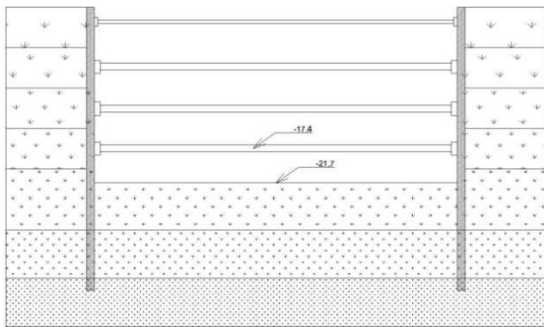


Figura 3.9 – Fase 5 da escavação não subfaseada

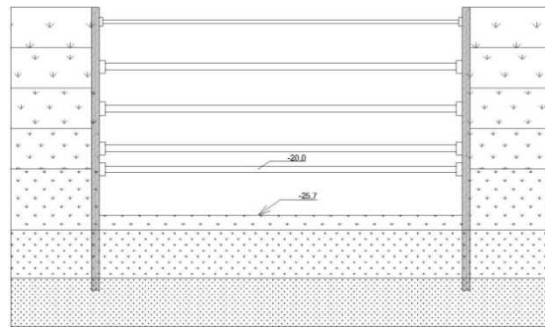


Figura 3.10 – Fase 6 da escavação não subfaseada

3.2.4.3. Escavação subfaseada (SF)

A escavação subfaseada consiste em escavar em primeiro lugar o lado esquerdo, onde presumivelmente poderá haver maiores deslocamentos, e depois do lado direito, onde se pretende controlar melhor os deslocamentos. Assim, na escavação subfaseada são incluídas as letras **a** e **b** que correspondem à escavação do lado esquerdo e do lado direito, respectivamente, sendo que a fase b na escavação subfaseada corresponde, na escavação não subfaseada, à fase com o mesmo número.

O faseamento desta escavação tem como etapas:

- Fase 1 – Escavação até 2,4 m de profundidade;
- Fase 2a – Aplicação do 1º nível de escoras e escavação até 8,5 m do lado esquerdo;
- Fase 2b – Escavação até 8,5 m do lado direito;
- Fase 3a – Aplicação do 2º nível de escoras e escavação até 13,7 m do lado esquerdo;
- Fase 3b – Escavação até 13,7 m do lado direito;
- Fase 4a – Aplicação do 3º nível de escoras e escavação até 18,6 m do lado esquerdo;
- Fase 4b – Escavação até 18,6 m do lado direito;
- Fase 5a – Aplicação do 4º nível de escoras e escavação até 21,7 m do lado esquerdo;
- Fase 5b – Escavação até 21,7 m do lado direito;
- Fase 6a – Aplicação do 5º nível de escoras e escavação até 25,7 m do lado esquerdo;
- Fase 6b – Escavação até 25,7 m do lado direito;

Uma vez que a fase 1 é igual à escavação não subfaseada, apenas se representa nas Figuras 3.11 a 3.20 os cálculos que diferem para a escavação subfaseada.

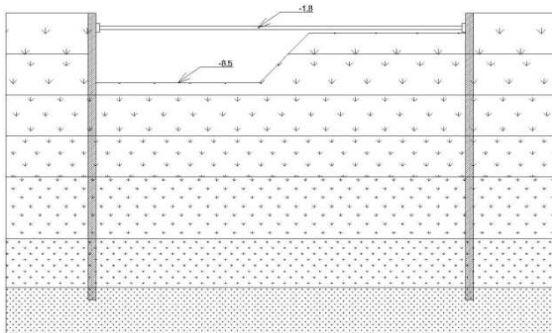


Figura 3.11 – Fase 2a da escavação subfaseada

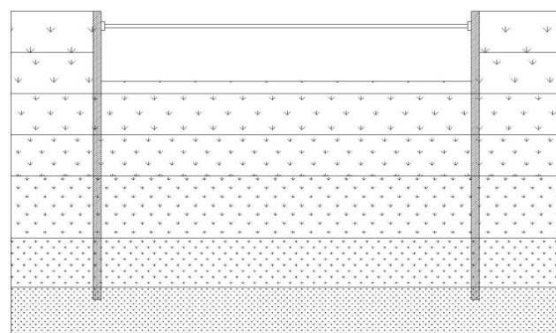


Figura 3.12 – Fase 2b da escavação subfaseada

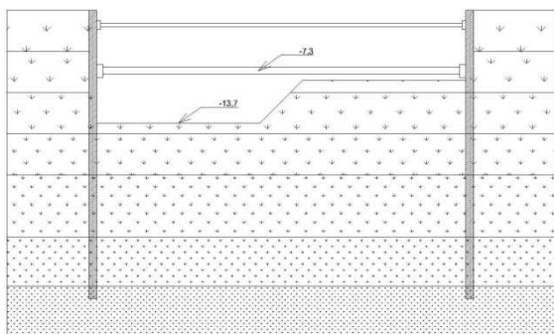


Figura 3.13 – Fase 3a da escavação subfaseada

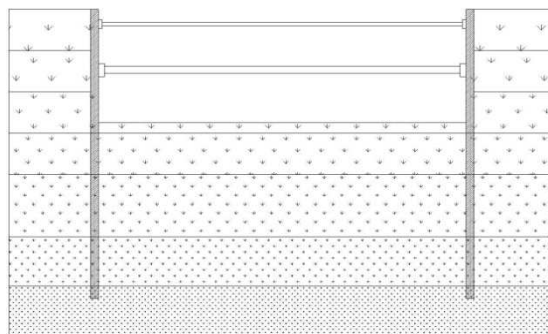


Figura 3.14 – Fase 3b da escavação subfaseada

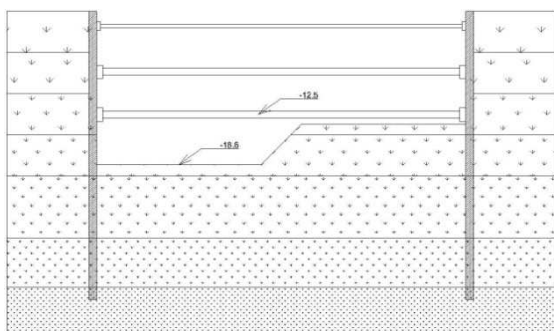


Figura 3.15 – Fase 4a da escavação subfaseada

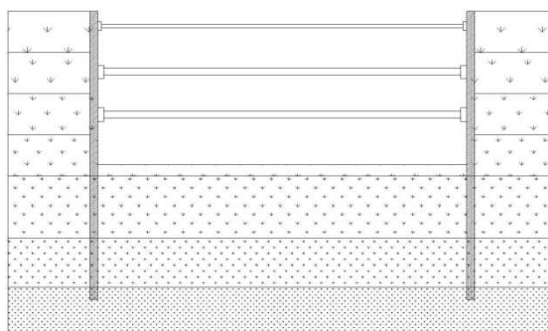


Figura 3.16 – Fase 4b da escavação subfaseada

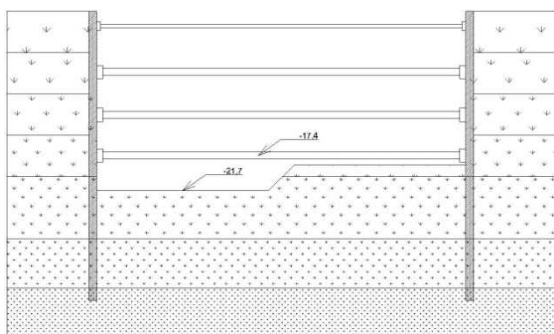


Figura 3.17 – Fase 5a da escavação subfaseada



Figura 3.18 – Fase 5b da escavação subfaseada

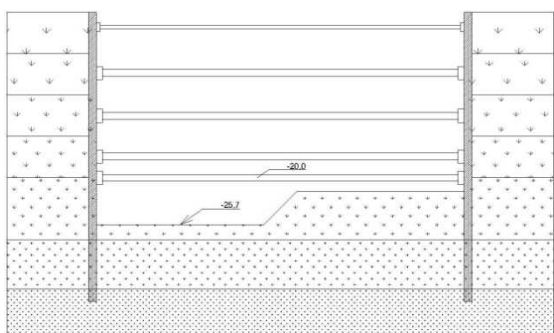


Figura 3.19 – Fase 6a da escavação subfaseada



Figura 3.20 – Fase 6b da escavação subfaseada

3.3. ANÁLISE DE RESULTADOS – ESCAVAÇÃO COM LARGURA DE 80 M

3.3.1. MOVIMENTOS ASSOCIADOS

Os deslocamentos horizontais da cortina para a escavação com 80 m de largura e realizada do modo convencional, isto é, não subfaseada, encontram-se representados na Figura 3.21.

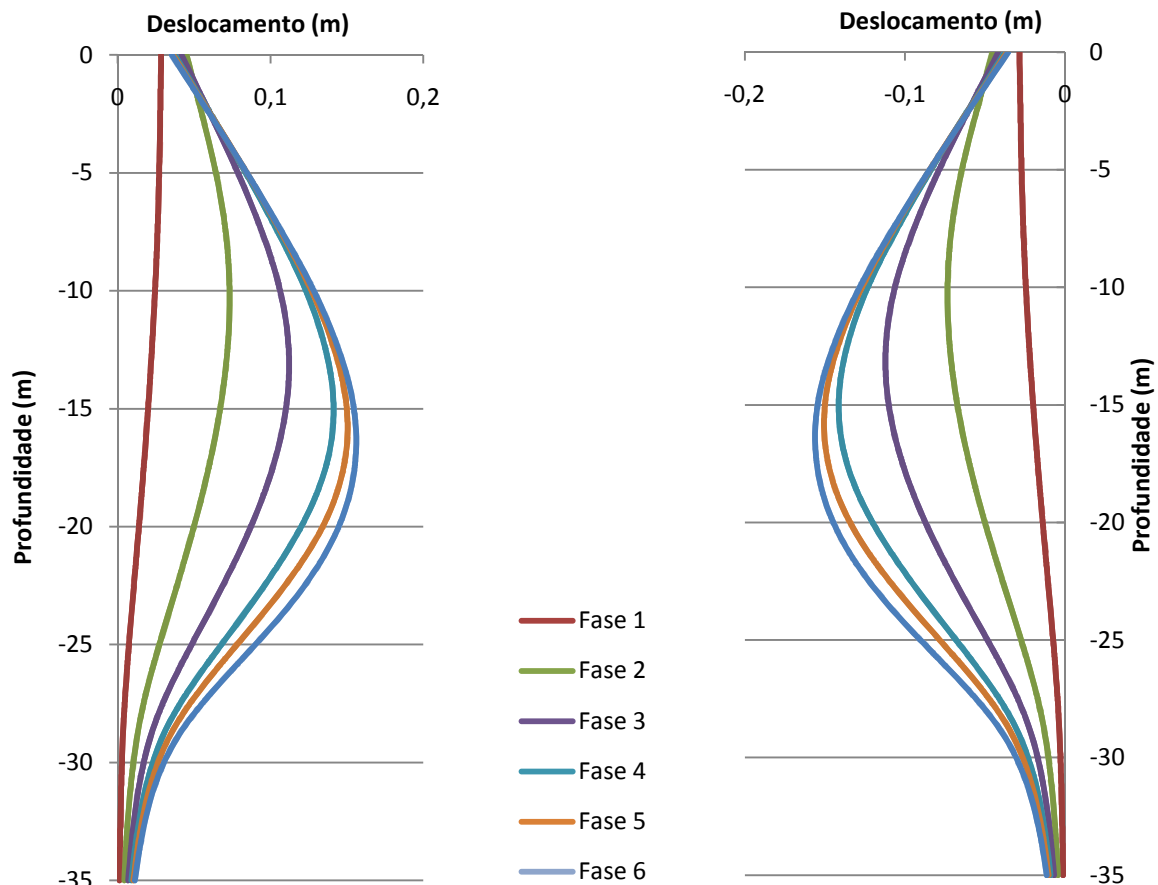


Figura 3.21 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.EP.NF

Os deslocamentos são iguais em ambos os lados, uma vez que a escavação é simétrica.

A deformada final da cortina depende de muitos factores, entre os quais as pressões de terras, a altura enterrada, as condições de apoio desta e do respectivo pé, a distância do fundo da escavação ao estrato rijo e a própria rigidez da cortina.

Inicialmente a cortina tem um comportamento autoportante, em que sofre uma rotação em torno do seu pé, em que os deslocamentos da cortina crescem de uma forma linear da base ao topo, apresentando o deslocamento máximo dessa fase no topo. A partir do momento que é colocado o primeiro nível de escoramento, a cortina começa a apresentar uma convexidade para a escavação, invertendo a tendência de deslocamento no topo da cortina. No entanto, o deslocamento máximo do topo da cortina verifica-se quando se coloca esse mesmo primeiro nível de escoramento e se escava mais uma fase devido à deformação da própria escora, sendo este máximo de 45 mm.

Com o progresso da escavação e a colocação em serviço dos vários níveis de escoras a situação modifica-se progressivamente: os deslocamentos no topo deixam de ser máximos, verificando-se um crescimento destes desde o topo até uma certa profundidade, para decrescerem depois até ao pé da cortina. A face exposta da cortina assume, assim, a referida convexidade, que é tanto mais pronunciada quanto maiores são a flexibilidade da cortina e a rigidez e o pré-esforço dos seus apoios, isto é, escoras.

Para cada fase, os deslocamentos acima da base de escavação intermédia são relativamente baixos, estando intrinsecamente dependentes da rigidez das escoras, pelo que maior parte dos deslocamentos ocorre abaixo da base de escavação. Estando o pé da parede adequadamente apoiado, os seus deslocamentos serão nulos ou reduzidos. O valor máximo de deslocamento obtido foi de 156,1 mm a 16,2 m de profundidade, correspondendo a 0,6% da profundidade máxima da escavação.

Para a escavação subfaseada, os deslocamentos horizontais na cortina são os indicados na Figura 3.22.

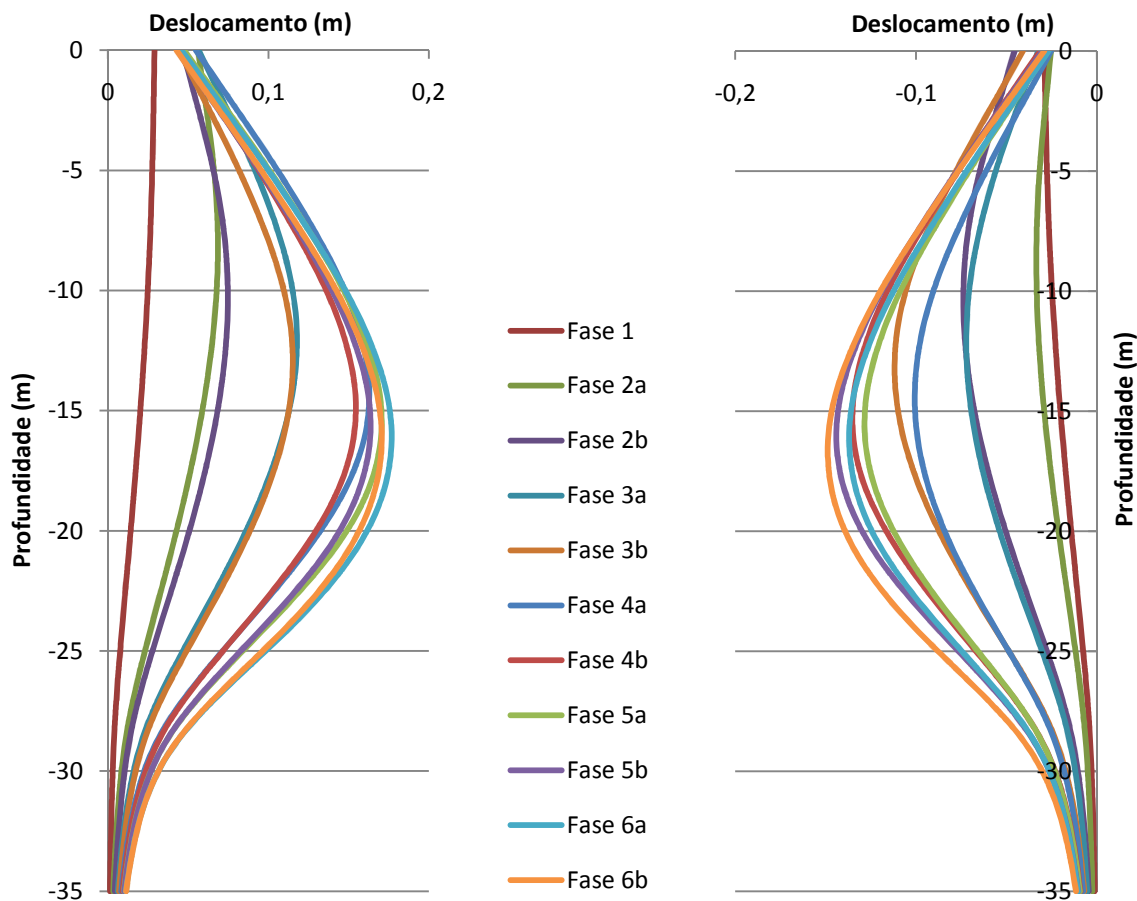


Figura 3.22 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.EP.SF

Sempre que se escava do lado esquerdo, a cortina do mesmo lado sofre um deslocamento que aumenta o esforço nas escoras, fazendo com que a cortina do lado direito recupere parte do deslocamento sofrido na fase anterior. Este acontecimento também se verifica no sentido oposto, ou seja, quando se escava do lado direito, a cortina do lado esquerdo sofre uma redução de parte dos deslocamentos da fase anterior. Note-se que esta recuperação é mais significativa acima da base de escavação, uma vez

que é onde se encontram as escoras que transferem os esforços das cortinas de um lado para o outro, mas sendo o lado direito escavado posteriormente, é este que sofre menores deslocamentos.

Com este subfaseamento, do lado esquerdo resultou um deslocamento máximo da cortina de 177 mm e do lado direito um deslocamento de 149 mm.

Observando estes resultados, verifica-se um menor deslocamento do lado direito da escavação em relação à escavação não subfaseada com uma diminuição de 5% do deslocamento máximo, mas com um aumento de 13,5% do lado esquerdo.

O deslocamento máximo no topo da cortina do lado esquerdo é 56,5 mm e 45,5 mm do lado direito. Como o deslocamento máximo na escavação subfaseada foi inferior, a rotação da cortina, devido à convexidade, também foi menor. Sendo a rotação em torno do primeiro nível de escoras que faz com que os deslocamentos no topo da cortina sejam menores, e quanto menor for a rotação da cortina menor é a recuperação do deslocamento do topo desta, resultando em o deslocamento do topo da cortina do lado direito na escavação subfaseada ser ligeiramente superior ao da escavação não subfaseada.

Os deslocamentos verticais da superfície para a escavação não subfaseada são idênticos à esquerda e à direita. Assim, apresenta-se apenas o perfil de assentamentos do lado esquerdo na Figura 3.23.

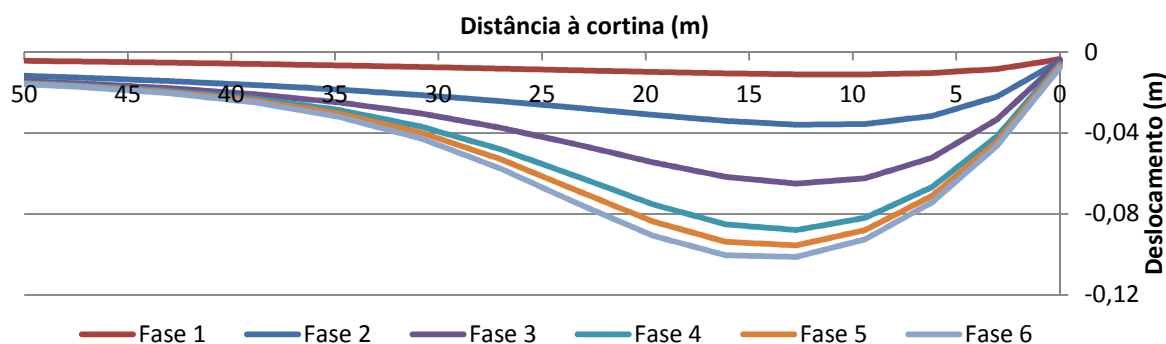


Figura 3.23 – Assentamentos da superfície – 80.EP.NF

Em relação aos deslocamentos da superfície compete dizer que o perfil da bacia de subsidência é típico de escavações em solos moles em que o pé da cortina apresenta boas condições de apoio. Estas condições permitem que na superfície de contacto da parede com o maciço suportado, aquela exerça sobre este tensões tangenciais de sentido ascendente que garantem a redução dos assentamentos da superfície do terreno na zona mais próxima da escavação. Os assentamentos máximos verificar-se-ão, portanto, a determinada distância da face de corte, assumindo a superfície uma certa concavidade. Sendo o assentamento da superfície do maciço remanescente intrínseco ao deslocamento da cortina do mesmo lado, os assentamentos ao longo do progresso da escavação acompanham o deslocamento da cortina. Tal pode ser verificado comparando a Figura 3.21 com a Figura 3.23. O assentamento máximo proveniente deste cálculo foi de 101,3 mm.

Para esclarecer esta relação entre os assentamentos da superfície e os deslocamentos da parede, analise-se a Figura 3.24 em que O'Rourke (1981) apresenta resultados da observação de 7 escavações com profundidades entre os 8,0 e 18,0 m com apoios de vários tipos mas com a extremidade inferior fixa num estrato rijo. O mesmo autor define um parâmetro, C_D , para traduzir o modo como a cortina se desloca: C_D é igual a 1 na fase autoportante e diminui com o progresso da escavação. Na figura, este

parâmetro está relacionado com a razão entre as componentes vertical e horizontal dos deslocamentos da superfície medidos topograficamente.

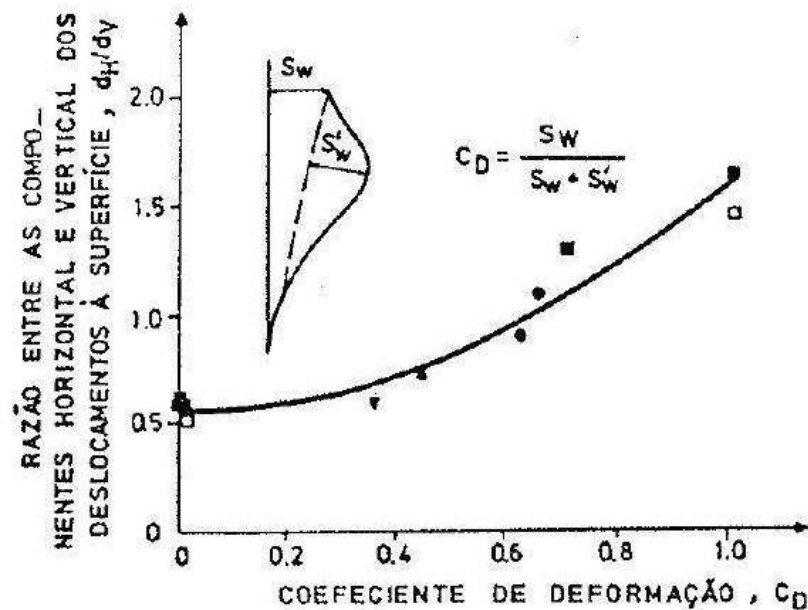


Figura 3.24 – Relação entre os deslocamentos da parede e do terraplino (O'Rourke, 1981)

Continuando na mesma figura, na fase autoportante, em que C_D é igual a 1, os deslocamentos da superfície são essencialmente horizontais. Pelo contrário, quando o valor de C_D decresce, isto é, quando se desenvolve a convexidade da cortina de suporte apoiada nos dois extremos, a componente vertical dos deslocamentos do terraplino ganha maior importância. Portanto, parece que a grandeza dos assentamentos não está directamente dependente dos deslocamentos máximos da parede mas depende acentuadamente de como esta se desloca para a escavação.

A escavação subfaseada resulta nos perfis de deslocamentos verticais da Figura 3.25, em que em cima está o lado esquerdo da escavação e em baixo o lado direito.

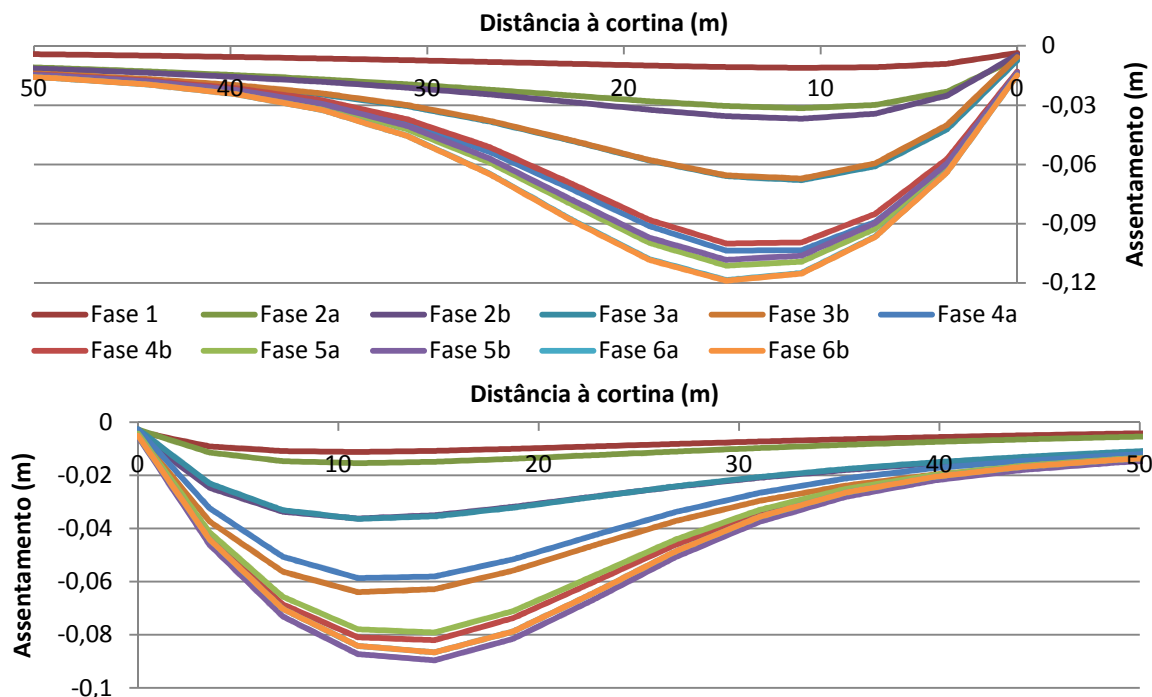


Figura 3.25 – Assentamentos da superfície – 80.EP.SF

No caso da escavação subfaseada, os assentamentos da superfície acontecem quase exclusivamente quando se escava do lado que se está a analisar. Por isso, nota-se que os perfis de assentamentos estão aos pares, ou seja, para o lado direito, o perfil da fase 1 está junto ao da fase 2a e o perfil da fase 2b está junto ao da fase 3a e assim sucessivamente, podendo haver um levantamento em relação à fase anterior derivado da reposição parcial dos deslocamentos horizontais da cortina.

Desta escavação resulta os valores de assentamento máximo, para o lado esquerdo e direito, respectivamente, de 119 mm e 90 mm. É clara a diferença entre os dois lados da escavação, assim como em relação à escavação não subfaseada, tendo-se registado uma redução do assentamento do lado direito de 11,5%.

O levantamento do fundo de escavação deve ser também analisado, não só por ser importante caso se for construir uma estrutura cujas fundações vão assentar no solo ao nível ou muito pouco abaixo da base de corte, logo os assentamentos desta dependerão significativamente dos deslocamentos ascendentes que foram permitidos, mas para se poder ver o movimento da massa de terra que segura uma das cortinas enquanto o outro lado é escavado. Nas Figuras 3.26 a 3.36 apresentam-se os movimentos associados ao levantamento do fundo da escavação para a escavação subfaseada.

Nestas figuras é mostrada a azul a posição do fundo de escavação de projecto, ou seja, as profundidades indicadas no faseamento no capítulo 3.2.4.3 e a vermelho a posição do fundo da escavação resultante do levantamento deste ampliado 30 vezes. Os valores no eixo vertical indicam a cota em metros a que se situa o fundo de escavação nessa mesma fase.

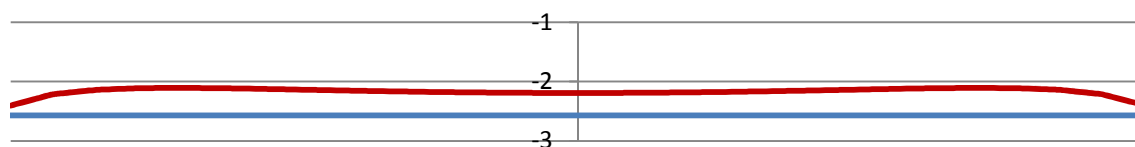


Figura 3.26 – Movimento do fundo de escavação – Fase 1 – 80.EP.SF

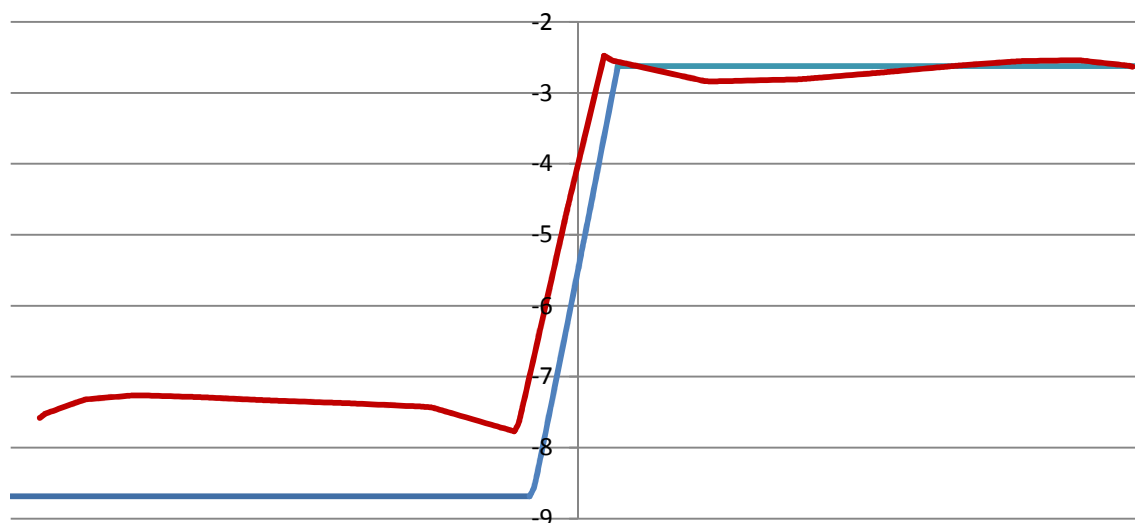


Figura 3.27 – Movimento do fundo de escavação – Fase 2a – 80.EP.SF

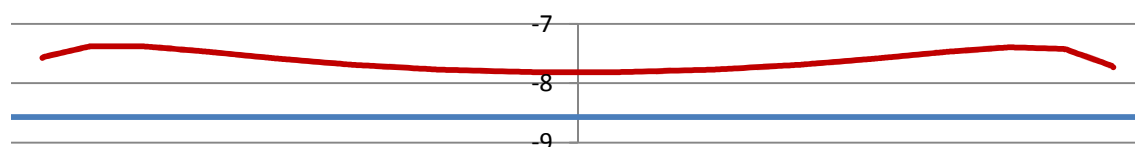


Figura 3.28 – Movimento do fundo de escavação – Fase 2b – 80.EP.SF

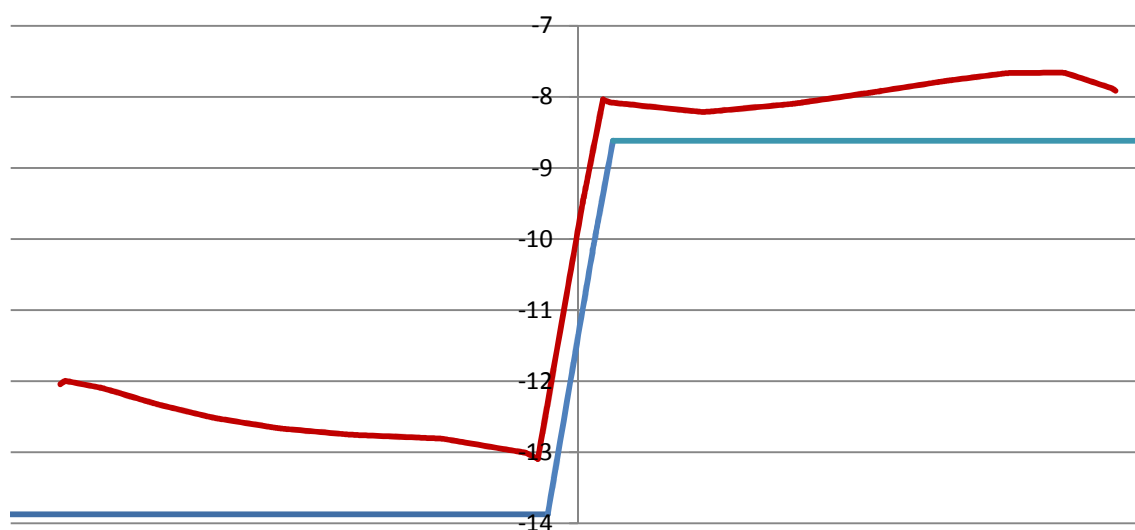


Figura 3.29 – Movimento do fundo de escavação – Fase 3a – 80.EP.SF

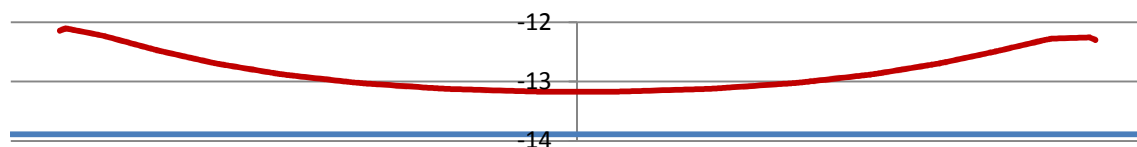


Figura 3.30 – Movimento do fundo de escavação – Fase 3b – 80.EP.SF

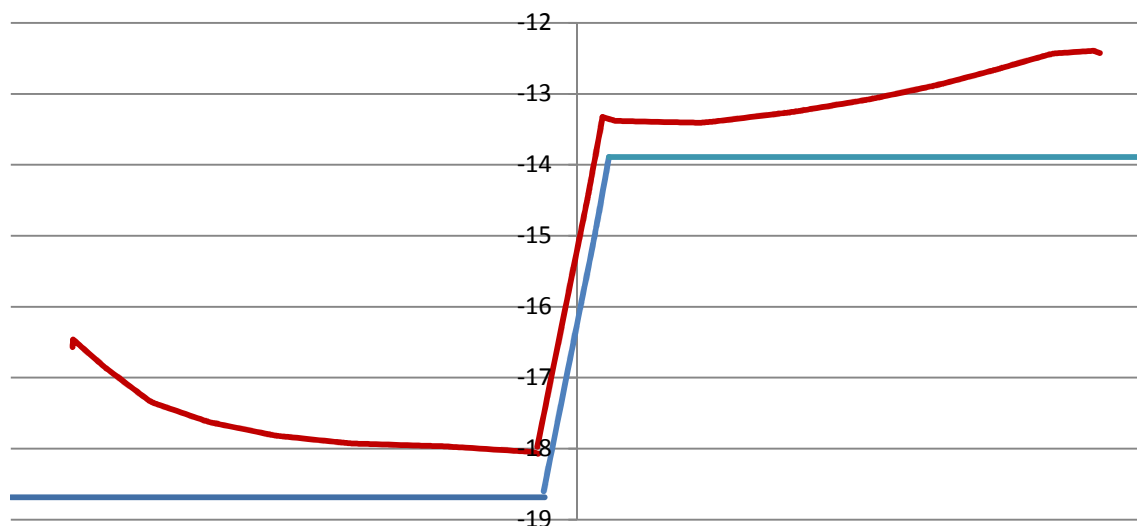


Figura 3.31 – Movimento do fundo de escavação – Fase 4a – 80.EP.SF

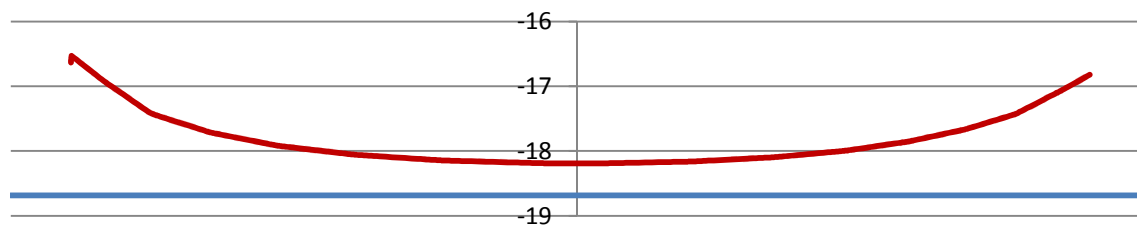


Figura 3.32 – Movimento do fundo de escavação – Fase 4b – 80.EP.SF

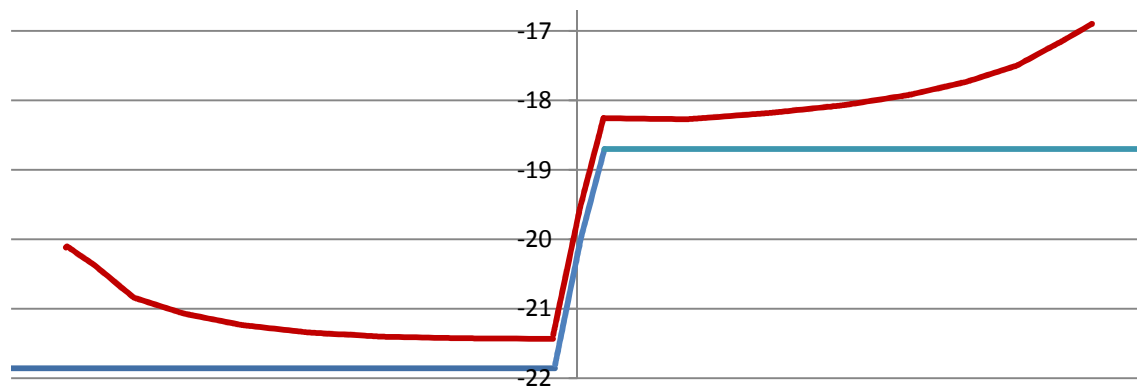


Figura 3.33 – Movimento do fundo de escavação – Fase 5a – 80.EP.SF

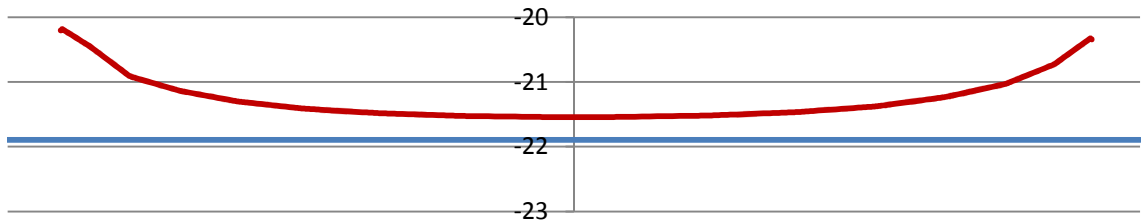


Figura 3.34 – Movimento do fundo de escavação – Fase 5b – 80.EP.SF

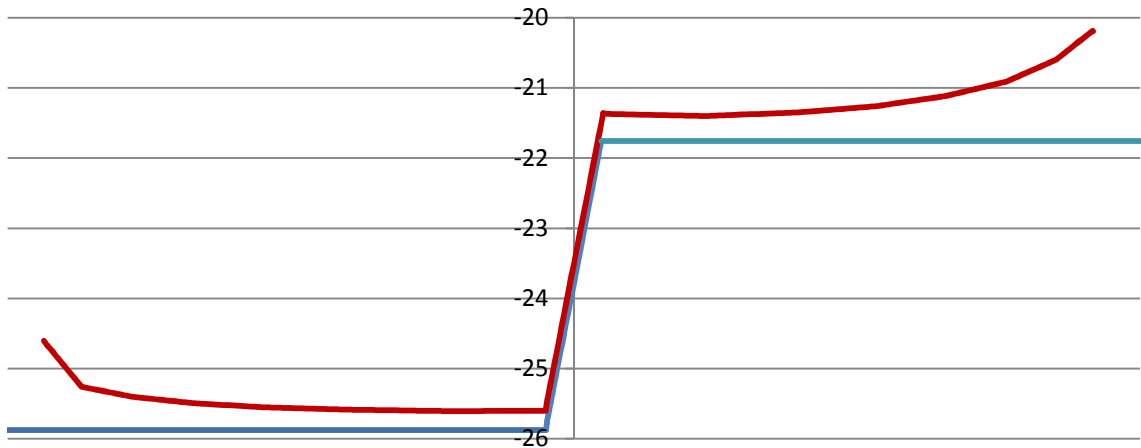


Figura 3.35 – Movimento do fundo de escavação – Fase 6a – 80.EP.SF

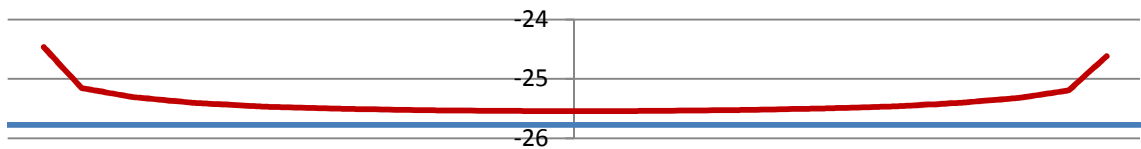


Figura 3.36 – Movimento do fundo de escavação – Fase 6b – 80.EP.SF

Uma rápida análise das fases em que a escavação está ao mesmo nível em toda a largura da escavação, fases com a letra **b**, é possível ver que o levantamento do fundo é típico para estas escavações. Nas zonas próximas das cortinas de contenção os deslocamentos do fundo são maiores devido ao movimento da cortina para o interior da escavação que o obriga, por mobilização de tensões tangenciais entre esta e o solo, a deslocar-se também para o interior e para cima.

Analisando agora as fases em que é criado um talude no fundo de escavação, ou seja, fases com a letra **a**, é de reparar que nos primeiros o talude se desloca para a esquerda e que este movimento se torna menor com o progresso da escavação. Este movimento poderá significar que a massa de solo que suporta a cortina do lado direito enquanto o lado esquerdo é escavado não é suficiente, e por isso a cortina desloca-se para a escavação provocando um deslocamento do solo à frente desta.

3.3.2. ESTADO DE TENSÃO

Para melhor interpretação dos movimentos associados à escavação foi necessário observar as trajectórias de tensões de alguns dos elementos da malha de elementos finitos. Na Figura 3.37 estão representados os quatro elementos analisados em pormenor.

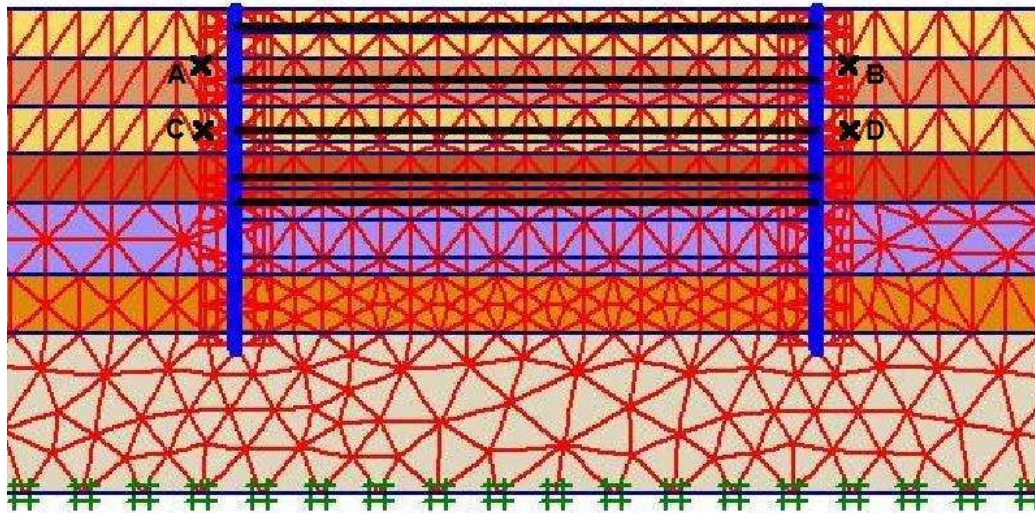


Figura 3.37 – Malha com os elementos analisados

Os pontos A e B estão posicionados simetricamente, assim como os pontos C e D. Os pontos A e B localizam-se entre o primeiro e o segundo nível de escoramento, em que o elemento tem as características geomecânicas do segundo estrato do solo, enquanto os pontos C e D estão ao nível do terceiro escoramento.

Apresentam-se nas Figuras 3.38 a 3.41 as trajectórias de tensões, em diagramas $s - t$, obtidas para os pontos A, B, C e D.

Os valores de s e t são obtidos através das expressões:

$$s = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \quad (3.1)$$

$$t = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} \quad (3.2)$$

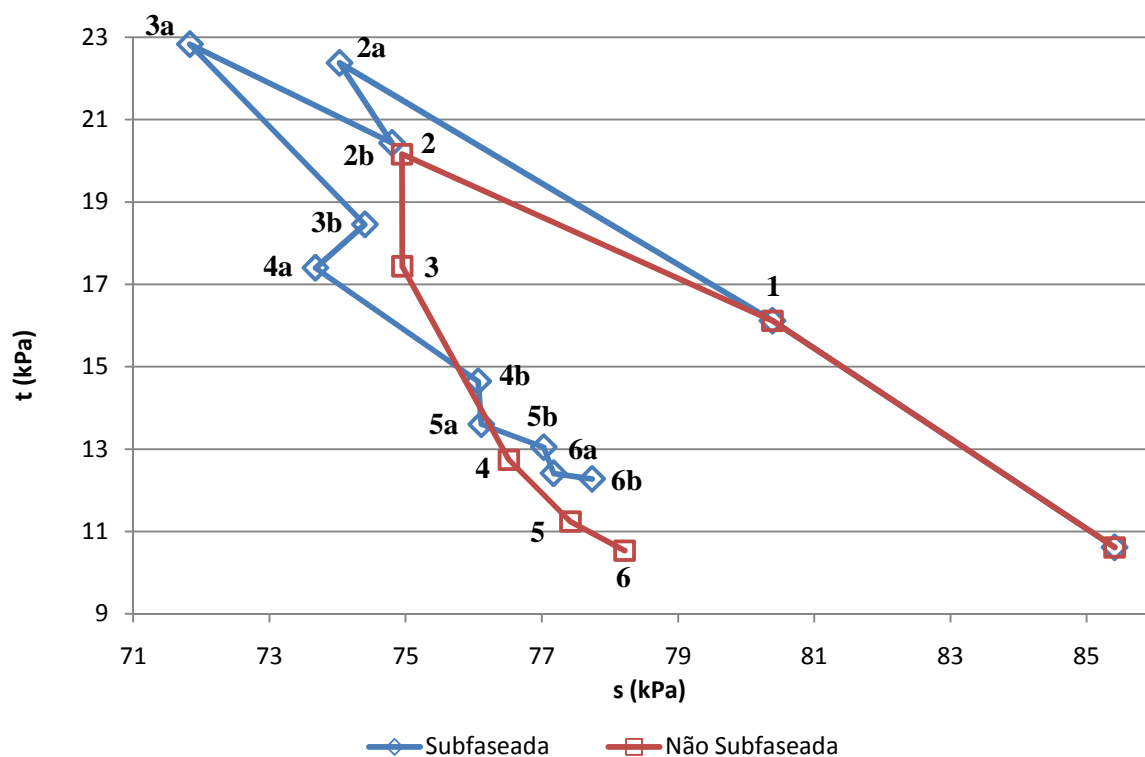


Figura 3.38 – Trajectórias de tensões totais do ponto A – 80.EP

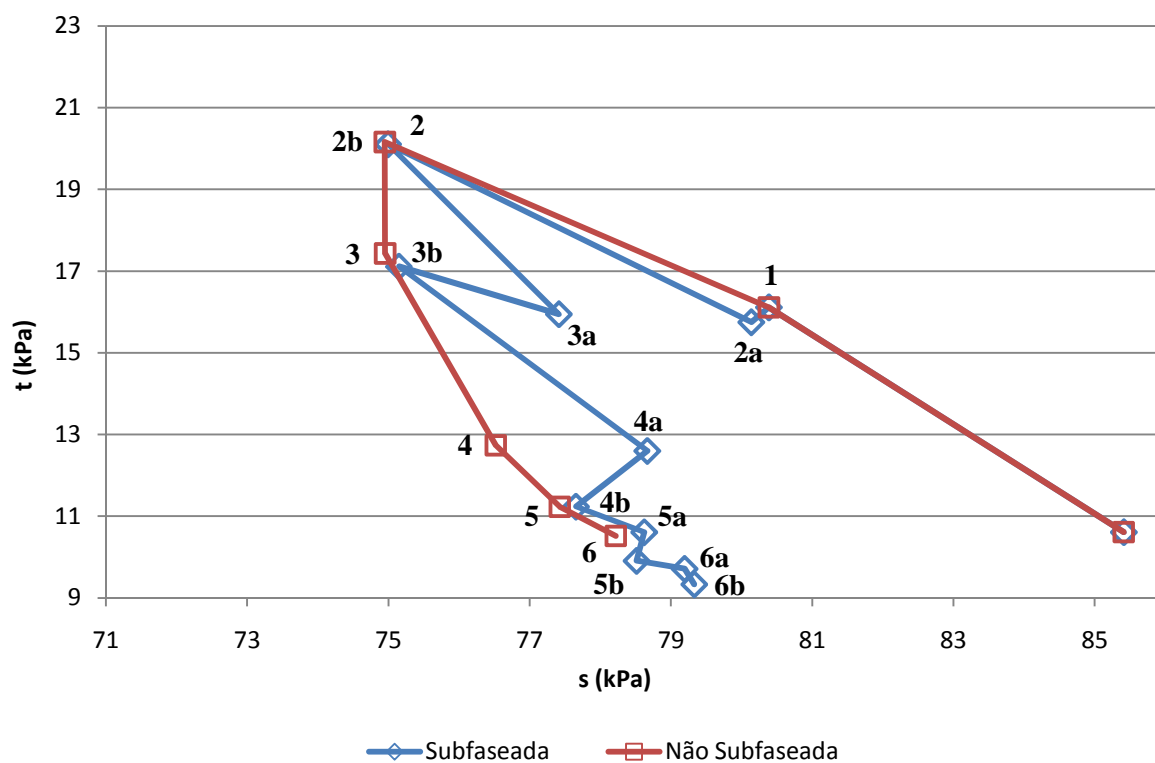


Figura 3.39 – Trajectórias de tensões totais do ponto B – 80.EP

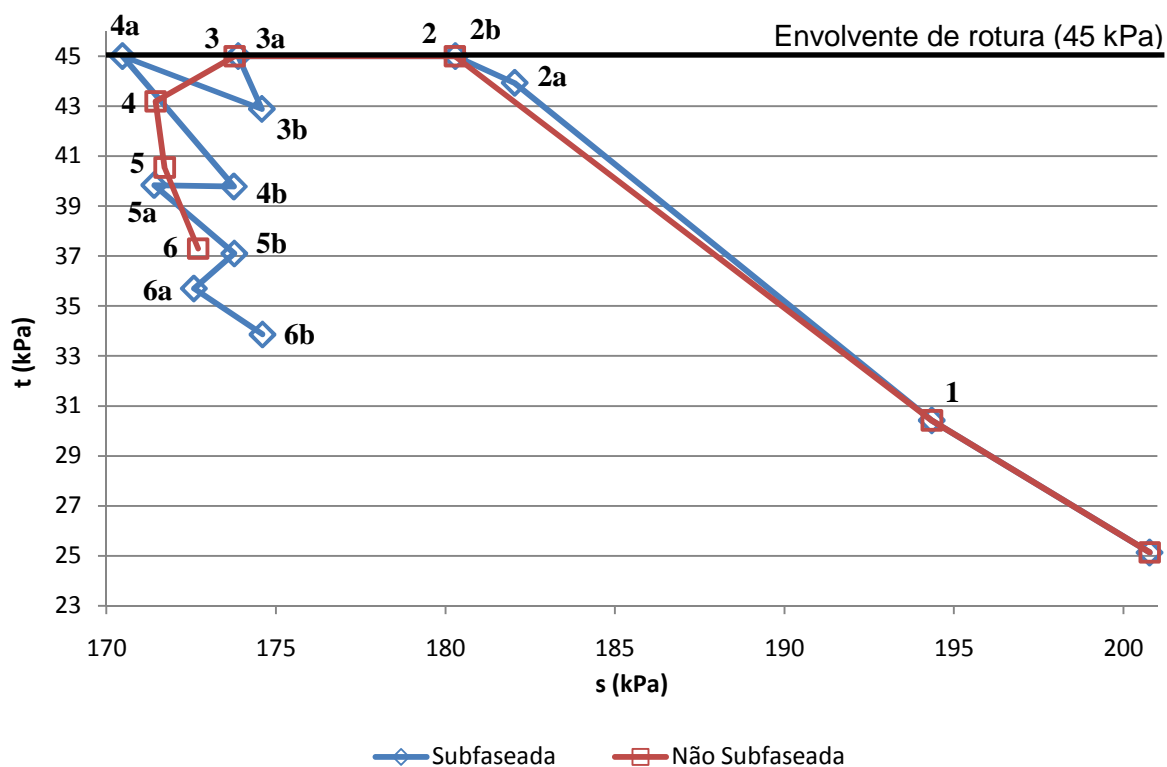


Figura 3.40 – Trajectórias de tensões totais do ponto C – 80.EP

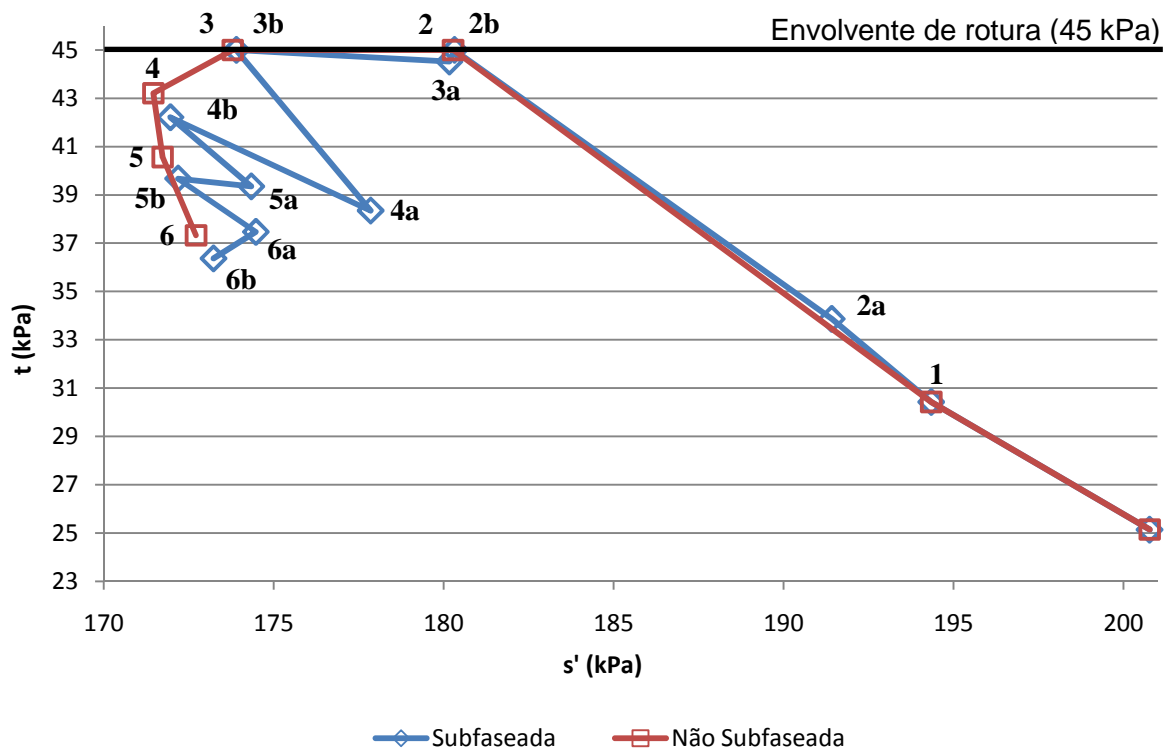


Figura 3.41 – Trajectórias de tensões totais do ponto D – 80.EP

Em primeiro lugar, é de reparar que a primeira fase de escavação é comum a ambas as escavações, uma vez que não é feito o subfaseamento da escavação. Em segundo, as trajectórias de tensões a vermelho que correspondem à escavação não subfaseada são iguais para pontos simétricos, ou seja, A e B, C e D.

Note-se que as curvas são muito semelhantes para todos os pontos. No início da escavação, a retirada do solo faz diminuir a tensão horizontal, consequentemente a tensão média, s , diminui e a tensão tangencial, t , aumenta, sendo uma trajectória típica em direcção ao estado activo. Já nas últimas fases de escavação, a rotação da cortina devido à sua convexidade faz com que, no topo, esta se desloque contra o maciço aumentando assim a tensão horizontal no solo, resultando numa diminuição da tensão tangencial e um aumento da tensão média. O aumento da tensão horizontal do solo também está associado ao aumento do esforço axial da escora depois do solo nesse patamar ter sido escavado.

Os ciclos de tensões são mais pronunciados quando as fases de escavação estão a uma profundidade mais próxima dos pontos considerados. Repare-se, por exemplo, nos pontos A e B em que nas fases mais adiantadas, as diferenças nas trajectórias de tensões subfaseada e não subfaseada são mínimas. O mesmo acontece nos pontos C e D em que as diferenças nas primeiras fases praticamente não existem.

É interessante verificar que, no ponto A, a trajectória de tensões da escavação subfaseada está pelo exterior da trajectória da escavação não subfaseada, ou seja, menores tensões médias e maiores tensões de corte, enquanto no ponto B acontece o contrário.

Atente-se ainda que os pontos C e D entram em plastificação quando se coloca o segundo nível de escoramento e se escava em seguida. Tal facto é visível nas Figuras 3.40 e 3.41 quando a tensão tangencial atinge 45 kPa.

Pelas trajectórias de tensões dos pontos B e D, ambos do lado direito, é possível observar que na escavação subfaseada a tensão tangencial é em todas as fases menor comparativamente com a escavação não subfaseada. Isto explica por que razão os deslocamentos da cortina do lado direito são menores, ou seja, se a tensão tangencial é menor a deformação desse ponto também vai ser menor e, por isso, menores são deslocamentos. O aumento da tensão horizontal por aplicação de esforço axial na escora derivado da escavação do lado esquerdo é verificado pela diminuição da tensão tangencial e aumento da tensão média, acontecimento que é favorável na medida em que quando o lado direito é escavado a tensão tangencial não atinge valores tão elevados, e por isso a deformação é menor, logo, são obtidos menores deslocamentos do lado direito.

Do lado esquerdo, sendo mais visível no ponto A, nas fases de escavação seguintes à primeira, a tensão tangencial da escavação subfaseada cresce com uma taxa superior à escavação não subfaseada. Isto é explicado por os esforços nas escoras serem inferiores durante a escavação do lado esquerdo. Consequentemente, a deformação do mesmo ponto na escavação subfaseada será maior, resultando em maiores deslocamentos. As quedas da tensão tangencial com o aumento da tensão média na escavação subfaseada deriva do aumento da tensão horizontal provocado pelo aumento do esforço axial da escora resultante da escavação do lado oposto ao que se está a analisar.

O facto de os deslocamentos do lado esquerdo serem maiores na escavação subfaseada é explicado pelo facto de a tensão tangencial ser superior nesta do que na escavação não subfaseada, resultando em maiores deformações. Mesmo no ponto C, em que a tensão tangencial é menor, uma vez que este plastificou, as deformações plásticas que daí resultam poderão ser maiores na escavação subfaseada e por isso, é obtida uma maior deformação no final.

Uma vez que as tensões verticais atrás da cortina se mantêm aproximadamente constantes ao longo de toda a escavação, a tensão horizontal é que tem um papel fundamental no comportamento da estrutura.

Sendo esta que faz variar a tensão de corte máxima, logo, os deslocamentos, a sua análise é deveras importante. Assim, foram analisadas 4 regiões do maciço atrás da cortina, duas ao mesmo nível mas de lados opostos da escavação para a possibilidade de comparação entre elas. A Figura 3.42 mostra as regiões analisadas.

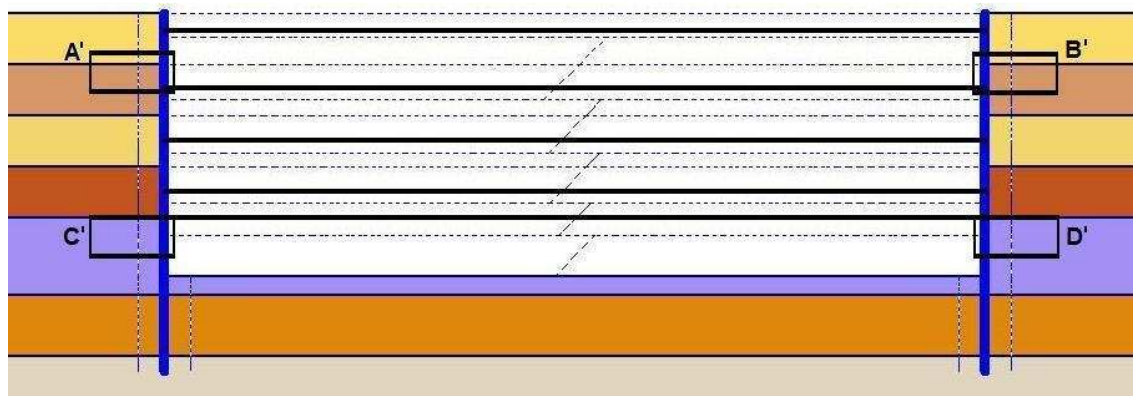


Figura 3.42 – Estrutura com as regiões analisadas

As regiões analisadas têm uma altura de 3 m e largura de 10 m, ou seja, mostram as tensões até uma distância de 10 m da cortina. As regiões A' e B' encontram-se a uma profundidade de 9,5 m até 12,5 m e as regiões C' e D' encontram-se de 20 m a 23 m de profundidade.

Nas Figuras 3.43 e 3.44 apresentam-se os diagramas das tensões horizontais nas regiões assinaladas.

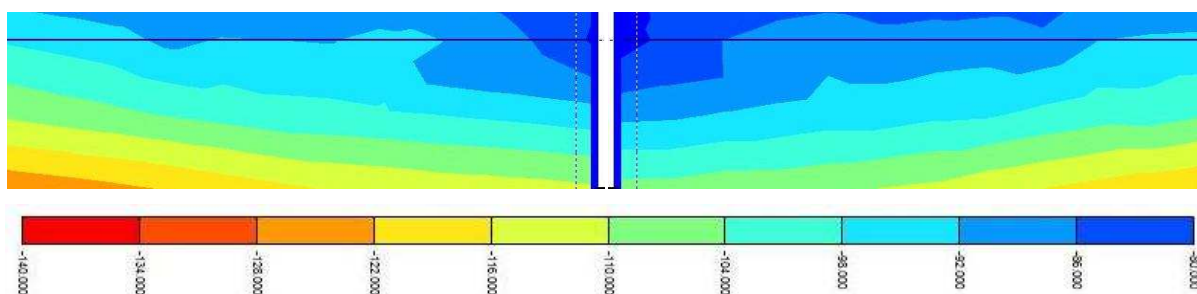


Figura 3.43 – Tensão horizontal das regiões A' e B' – 80.EP.SF

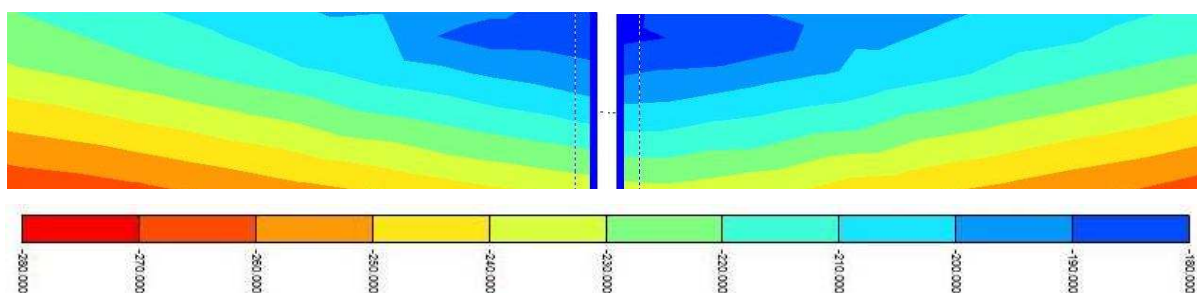


Figura 3.44 – Tensão horizontal das regiões C' e D' – 80.EP.SF

Observando a Figura 3.43 é possível ver que as tensões do lado esquerdo são maiores do que do lado direito. A diferença é mais visível nas regiões superiores onde os deslocamentos da cortina são maiores e onde o estado de tensão do maciço é mais afectado. Por outro lado, nas regiões inferiores a diferença já não é significativa.

Para uma melhor comparação das pressões de terras atrás da cortina entre os dois lados da escavação subfaseada e também com a escavação não subfaseada, apresentam-se estas na Figura 3.45.

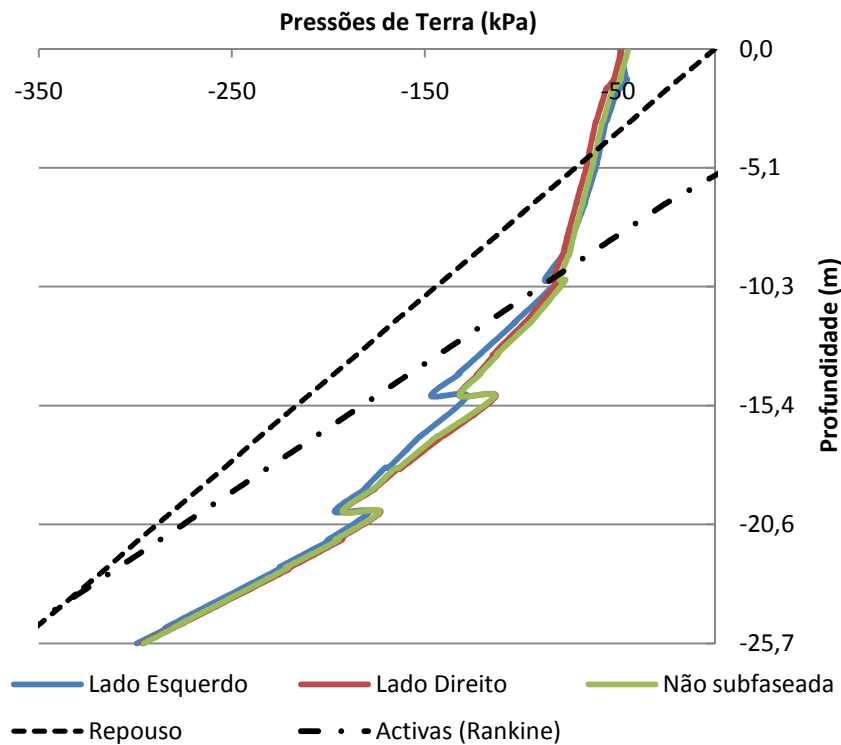


Figura 3.45 – Pressões de terra atrás da cortina – 80.EP

Na figura é novamente visível que as pressões de terras atrás da cortina, resultante das tensões horizontais do maciço, são maiores do lado esquerdo. No entanto, verifica-se que nos primeiros 10 m as pressões de terras são ligeiramente maiores do lado direito. Comparando as pressões de terra entre o lado direito da escavação subfaseada e a escavação não subfaseada é possível ver que as pressões são muito semelhantes e por isso a diferença de momentos entre as duas é mínima.

Parece contraditório afirmar que o lado com maiores deslocamentos apresenta tensões atrás da cortina maiores, mas este facto pode ser explicado.

Para melhor entender tal possibilidade, analise-se novamente as trajectórias de tensões dos pontos C e D, agora sobrepostas, para a escavação subfaseada.

Na Figura 3.46 estão representadas as duas trajectórias de tensões. Nem em todos os pontos estão identificadas as fases que representam por complicar a figura em demasia, mas estes podem ser identificados por interpolação com base na fase anterior e na seguinte.

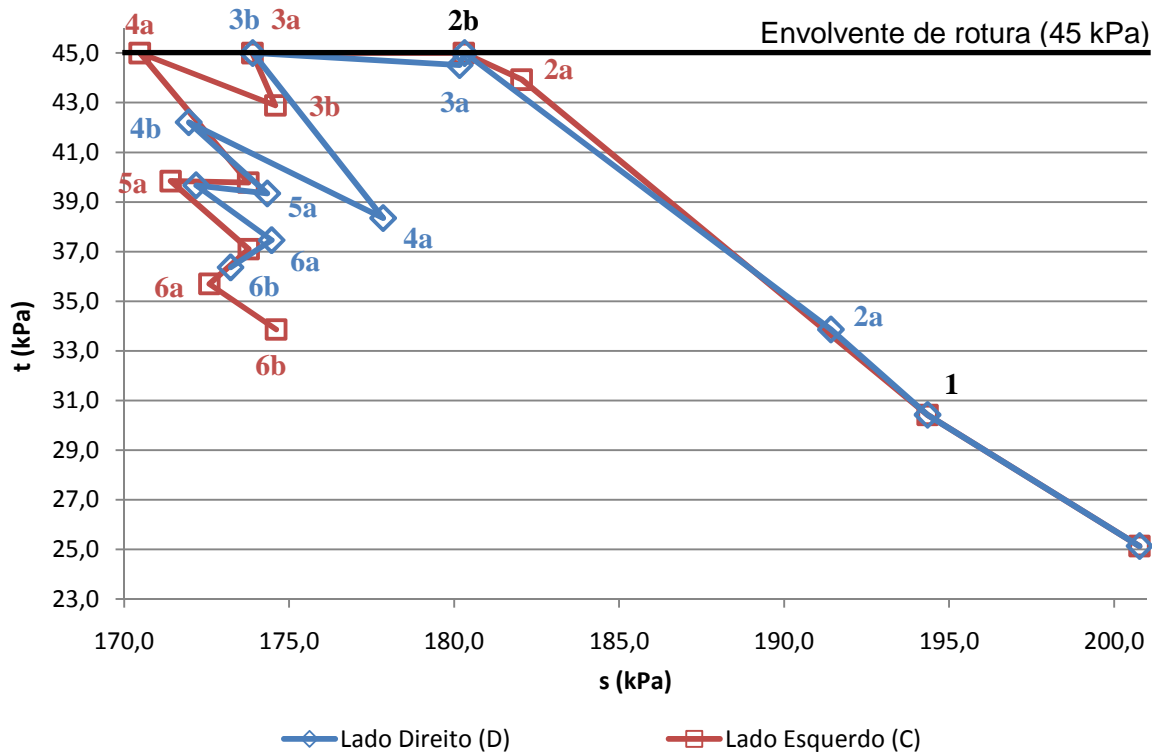


Figura 3.46 – Trajectórias de tensões totais dos pontos C e D – 80.EP.SF

É possível verificar que, no final da escavação, a tensão média, s , é maior do lado esquerdo, embora como foi visto este apresenta maiores deslocamentos. Isto acontece devido à plastificação dos pontos do lado esquerdo que faz com que estes tenham uma maior deformação, que resulta em maiores deslocamentos e que quando são descarregados ficam com uma deformação plástica que não pode ser recuperada, ou seja, quando a tensão horizontal do lado esquerdo aumenta com a escavação do lado direito, os deslocamentos não são recuperados e por isso tem maiores deslocamentos e maior tensão horizontal, uma vez que a tensão do lado direito diminui quando este é escavado.

Repare-se ainda que na Figura 3.45 as pressões de terra do lado esquerdo são maiores do que do lado direito apenas a partir de uma determinada profundidade. Tal deve-se ao facto de apenas a partir daquela profundidade haver plastificação do solo, como pode ser visível na Figura 3.47.

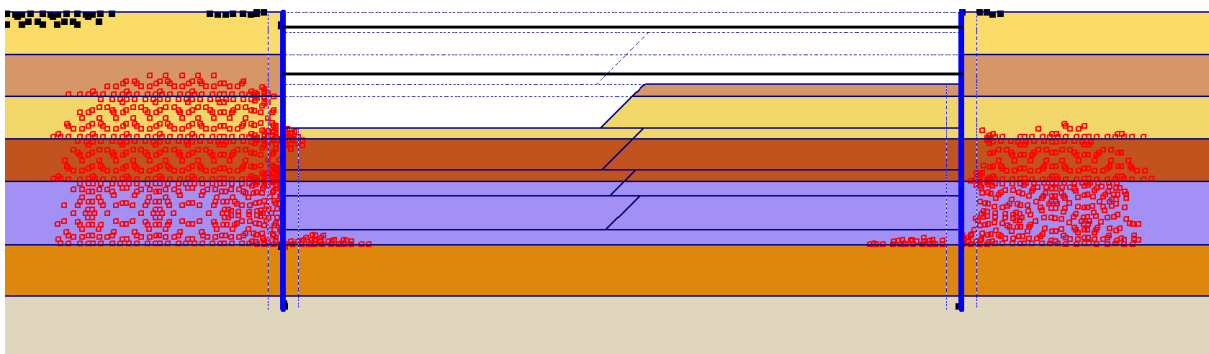


Figura 3.47 – Pontos em plastificação – Fase 3a – 80.EP.SF

3.3.3. ESFORÇOS ESTRUTURAIS

Com a evolução da escavação, a cortina tende a deslocar-se para o interior, o que leva a uma variação dos esforços nos vários níveis de escoras. Esta variação dos esforços axiais nas escoras na escavação não subfaseada está representada na Figura 3.48.

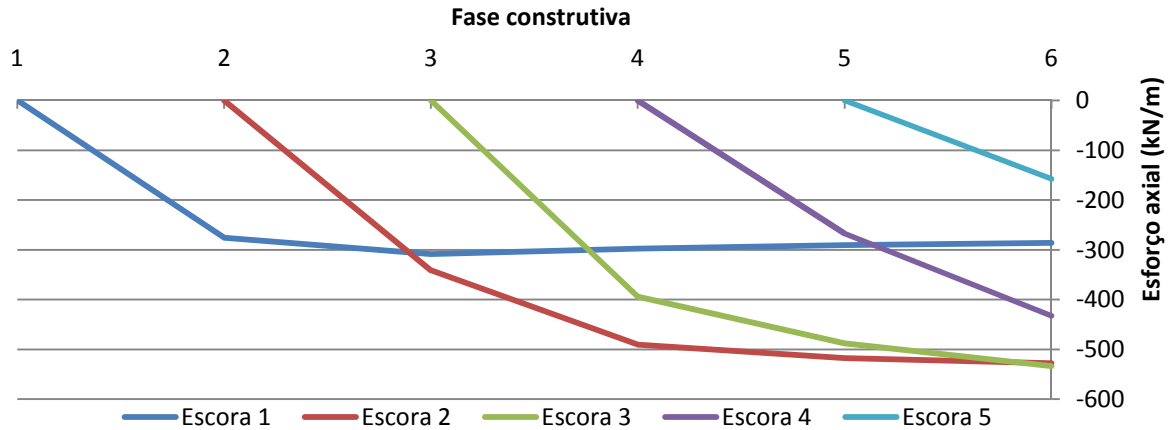


Figura 3.48 – Esforços nas escoras – 80.EP.NF

Os esforços axiais das escoras têm o seu crescimento máximo na fase imediatamente seguinte àquela em que são colocadas que é quando sofrem uma maior deformação resultante do deslocamento da cortina derivado dessa fase de escavação. A partir daí o aumento da tensão será menor devido ao facto de se colocarem mais níveis de escoras fazendo uma redistribuição dos esforços. Se a convexidade da cortina for elevada, pode fazer com que os esforços das escoras dos níveis superiores diminuam por consequência do deslocamento da cortina contra o maciço explicado anteriormente. O esforço axial no primeiro nível de escoras tem um máximo de 308 kN/m na fase em que é colocado o segundo nível, vindo a diminuir nas restantes fases de escavação. Os valores máximos do esforço axial para os restantes níveis de escoras são 528 kN/m, 534 kN/m, 433 kN/m e 158 kN/m, verificados na última fase de escavação.

Na Figura 3.49 estão representados os valores do esforço axial nas escoras para a escavação subfaseada.

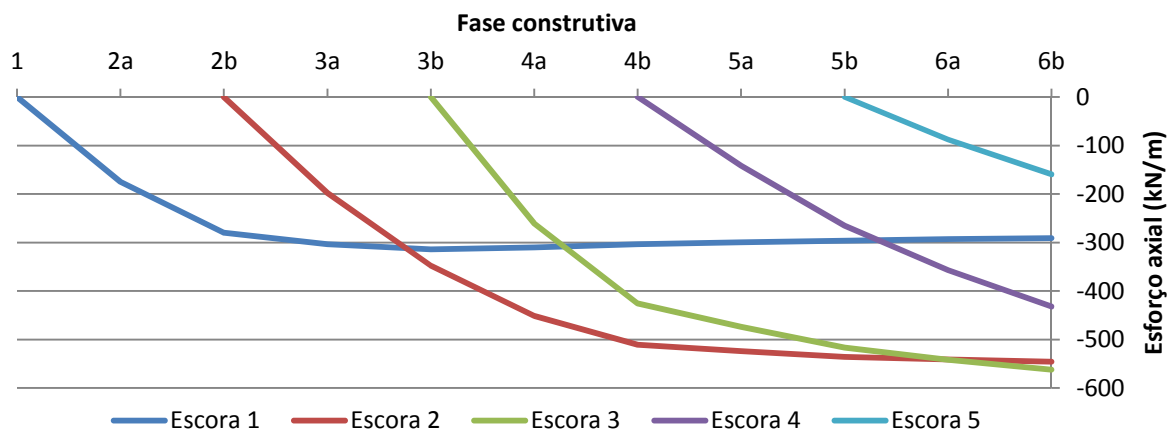


Figura 3.49 – Esforços nas escoras – 80.EP.SF

É de notar que a evolução dos esforços axiais nas escoras na escavação subfaseada é muito semelhante à evolução na escavação não subfaseada, não deixando de os valores serem muito próximos uns dos outros. Sendo os esforços máximos por ordem crescente de níveis 314 kN/m, 546 kN/m, 562 kN/m, 432 kN/m e 160 kN/m.

Na Figura 3.50 apresenta-se o diagrama de pressões de terras aparentes para as escavações não subfaseada e subfaseada.

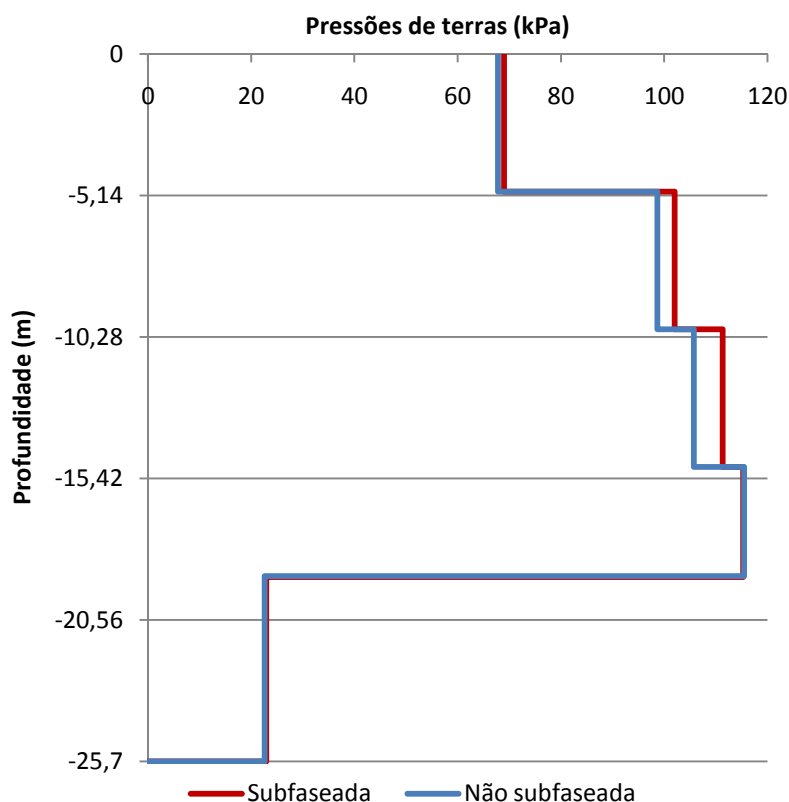


Figura 3.50 – Diagrama de pressões aparentes – 80.EP

O diagrama de momentos apresenta uma forma parabólica para o interior da escavação acima da base resultante dos impulsos de terra atrás da cortina que actuam como uma carga distribuída. Nos pontos onde estão aplicadas as escoras há uma redução do momento flector uma vez que as escoras actuam como uma carga concentrada num ponto. Abaixo da base de escavação, os momentos flectores têm sinal negativo e de elevada intensidade devido à fixação da parte enterrada pelo substrato.

Na Figura 3.51 estão representadas as envolventes dos momentos flectores das cortinas esquerda e direita para ambas as escavações.

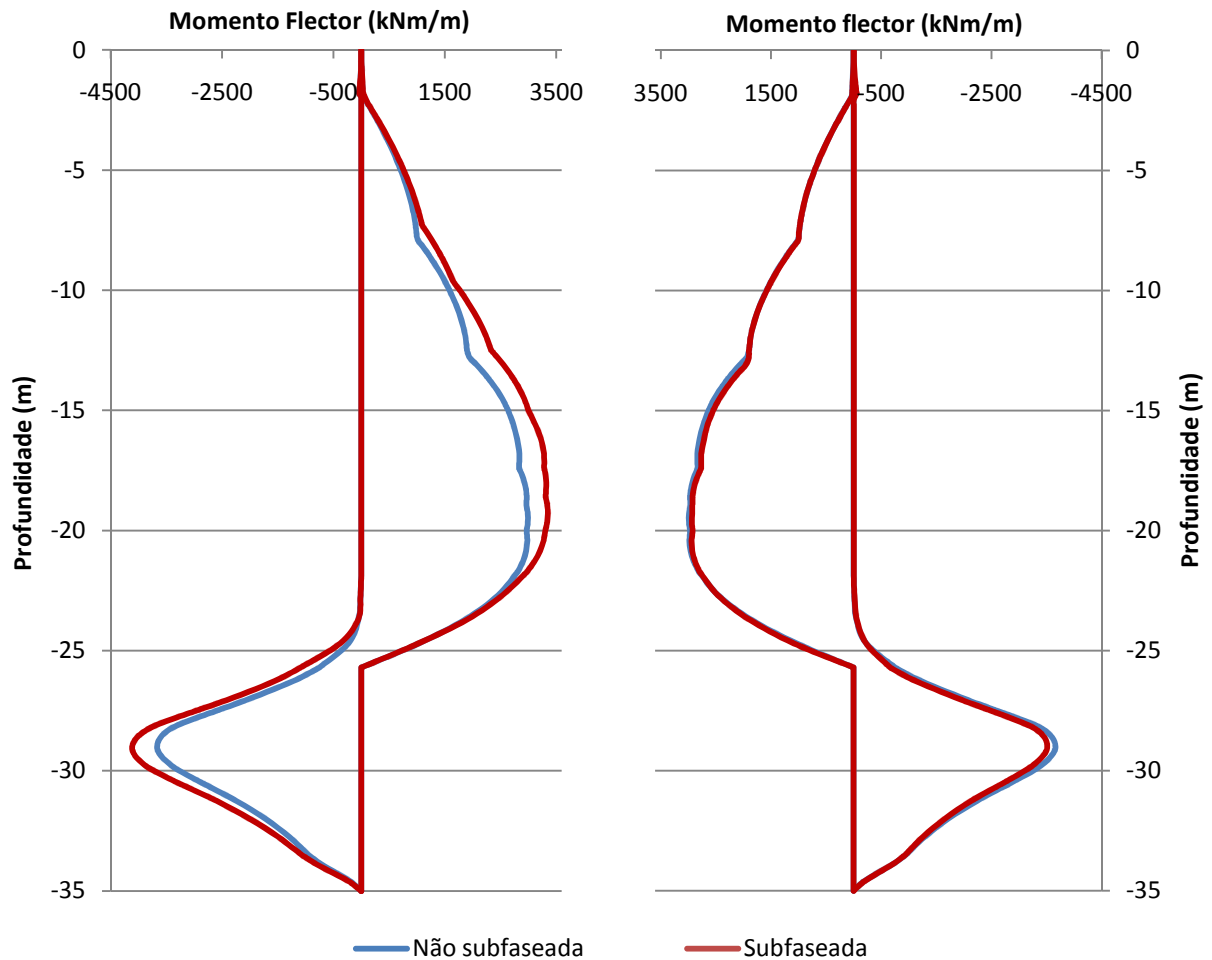


Figura 3.51 – Envolventes dos momentos flectores – 80.EP

Nesta figura é possível ver que, devido ao subfaseamento da escavação, os momentos flectores na cortina do lado esquerdo são superiores. Tal facto resulta de quando se escava do lado esquerdo os esforços nas escoras são menores em relação à escavação não subfaseada. Por outro lado, verifica-se uma redução mínima dos momentos flectores do lado direito, por no início da escavação do lado direito as escoras apresentarem esforço axial inicial. No Quadro 3.4 apresentam-se os valores máximos dos momentos flectores obtidos.

Quadro 3.4 – Valores máximos dos momentos flectores – 80.EP
(valores em kNm/m)

	Lado Esquerdo		Lado Direito	
	M_{\max}^-	M_{\max}^+	M_{\max}^-	M_{\max}^+
Escavação não subfaseada	-3665	2990	-3662	2991
Escavação subfaseada	-4115	3353	-3518	2942

Esta diferença de momentos é também explicada pelas tensões horizontais no maciço serem diferentes de um lado e do outro em relação à escavação não subfaseada, ou seja, maiores pressões de terra atrás da cortina resultam em maiores momentos flectores.

3.4. ANÁLISE DE RESULTADOS – TODAS AS LARGURAS DE ESCAVAÇÃO

3.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para além da escavação com 80 m de largura, foram também modeladas escavações com larguras de 20 m, 30 m, 45 m e 60 m. Com um maior número de resultados para várias larguras é possível analisar a influência que a largura poderá ter no subfaseamento de uma escavação. Neste subcapítulo é feito um resumo dos seus resultados.

3.4.2. MOVIMENTOS ASSOCIADOS

Uma vez que o interesse reside na cortina do lado direito que suporta o maciço mais sensível a deslocamentos, apenas são apresentados os resultados para esta.

Os deslocamentos horizontais máximos da cortina do lado direito para todas as larguras modeladas encontram-se no Quadro 3.5.

Quadro 3.5 – Resumo dos deslocamentos horizontais da cortina do lado direito – EP
(valores em mm)

Largura	20 m	30 m	45 m	60 m	80 m
Não subfaseada	87,3	106,0	126,7	141,6	156,1
Subfaseada	86,6	102,7	121,1	135,1	148,8

Determinando a relação entre os deslocamentos da escavação não subfaseada e a escavação subfaseada é possível ver que quanto maior a largura da escavação maior é a redução do deslocamento. Na Figura 3.52 está representado o quociente entre os deslocamentos máximos da cortina da escavação não subfaseada e da escavação subfaseada em função da largura de escavação.

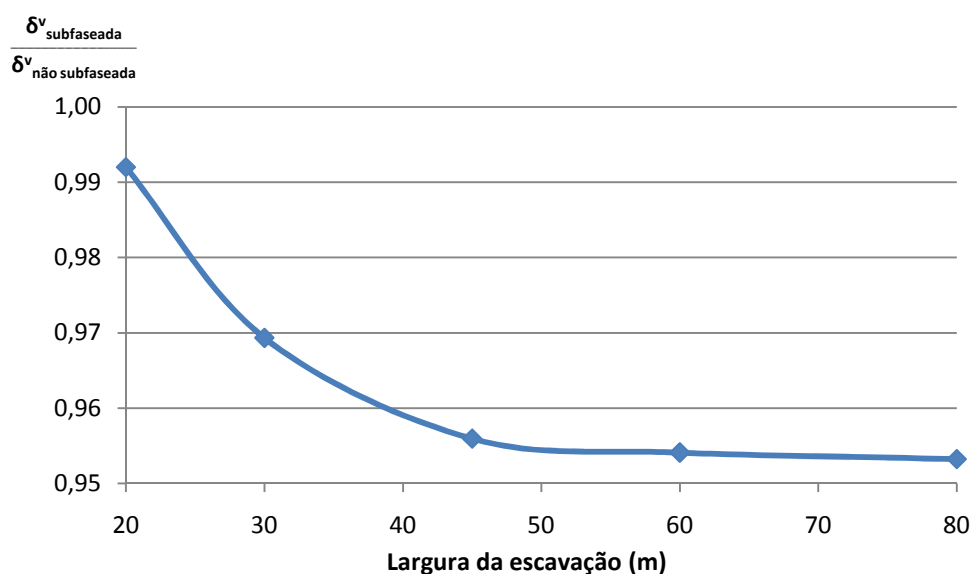


Figura 3.52 – Variação da redução do deslocamento máximo da cortina em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – EP

Para largura de 20 m a redução dos deslocamentos é mínima. Tal pode ser explicado por a massa de solo que suporta a cortina do lado direito enquanto o lado esquerdo é escavado não ser suficiente, ou seja, ao ser escavado o lado esquerdo a cortina do lado direito também sofre grandes deslocamentos.

Ao aumentar a largura de escavação a massa de solo estabilizadora tem um volume maior e por isso a redução dos deslocamentos na cortina do lado direito tende a ser maior. É de notar que esta redução tem um limite, ou seja, existe um patamar a partir do qual o aumento da largura não se traduz em ganhos na redução do deslocamento da cortina. Tal deve-se ao facto de a massa de solo que suporta a cortina do lado direito, a partir daquele patamar, já evita que a cortina do lado direito sofra deslocamentos significativos enquanto o lado esquerdo é escavado. Neste caso, o patamar verifica-se a partir de aproximadamente 50 metros de largura.

O Quadro 3.6 mostra os valores obtidos para os assentamentos da superfície do lado direito da escavação.

Quadro 3.6 – Resumo dos assentamentos da superfície do lado direito – EP
(valores em mm)

Largura	20 m	30 m	45 m	60 m	80 m
Não subfaseada	47,1	60,7	77,3	89,4	101,2
Subfaseada	46,2	58,2	72,4	84,0	95,0

A influência da largura da escavação na redução do assentamento da superfície do lado direito está representada na Figura 3.53.

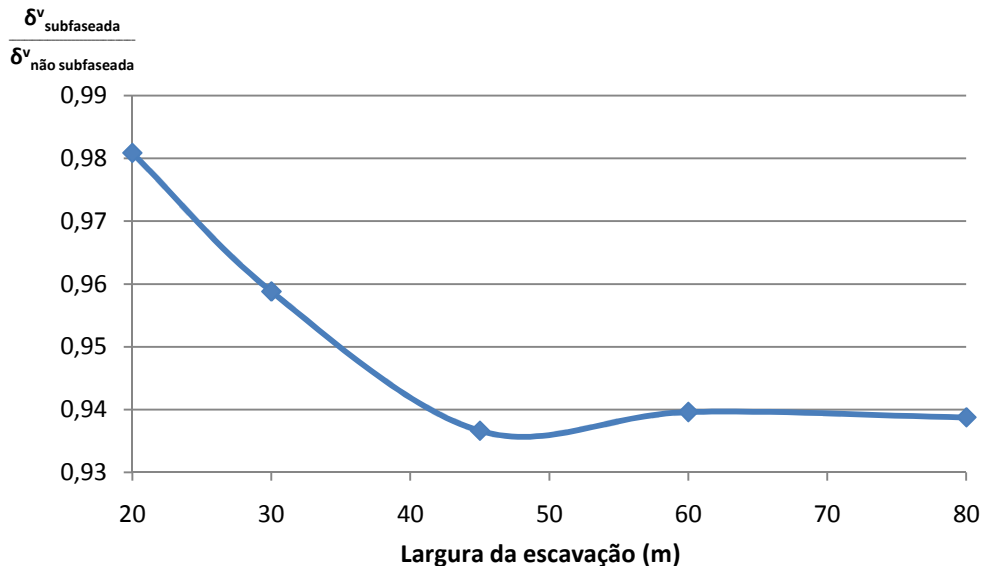


Figura 3.53 – Variação da redução do assentamento em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – EP

A redução dos assentamentos da superfície do lado direito já era previsível, uma vez que estes estão intrinsecamente relacionados com o deslocamento da cortina, e por isso apresenta um diagrama muito semelhante. É possível verificar que para larguras pequenas como 20 m há uma redução de 2% do assentamento e que para larguras superiores como de 80 m a redução chega aos 6,5%.

3.4.3. ESFORÇOS ESTRUTURAIS

Os esforços axiais máximos nas escoras que apoiam a cortina estão apresentados no Quadro 3.7 para a escavação não subfaseada e no Quadro 3.8 para a escavação subfaseada. A variação do esforço axial ao longo do processo construtivo para as restantes larguras é muito semelhante ao apresentado no subcapítulo 3.3.3, e por isso apenas se apresentam os valores máximos.

Quadro 3.7 – Esforços máximos nas escoras na escavação não subfaseada – EP
(valores em kN/m)

Largura	20 m	30 m	45 m	60 m	80 m
Escora 1	-350,5	-345,1	-325,8	-318,1	-308,4
Escora 2	-635,5	-604,3	-575,9	-553,4	-528,0
Escora 3	-734,1	-661,4	-602,9	-566,2	-533,7
Escora 4	-630,4	-567,5	-502,3	-464,4	-432,8
Escora 5	-289,1	-232,4	-195,8	-175,3	-157,6

Quadro 3.8 – Esforços máximos nas escoras para a escavação subfaseada – EP
(valores em kN/m)

Largura	20 m	30 m	45 m	60 m	80 m
Escora 1	-355,4	-350,7	-333,3	-320,8	-291,0
Escora 2	-659,8	-618,0	-586,8	-566,9	-545,6
Escora 3	-753,3	-685,7	-630,5	-597,0	-562,3
Escora 4	-604,0	-560,5	-497,4	-465,8	-432,4
Escora 5	-283,2	-236,7	-193,0	-177,6	-159,9

Antes de mais é de notar que o aumento da largura de escavação leva a uma redução progressiva do esforço nas escoras. Isto deve-se ao facto de o aumento da largura reduzir a rigidez axial efectiva das escoras. Esta redução leva a maiores deslocamentos laterais e a maiores momentos flectores máximos.

Na Figura 3.54 está representada a influência da largura de escavação na variação do esforço axial nas escoras.

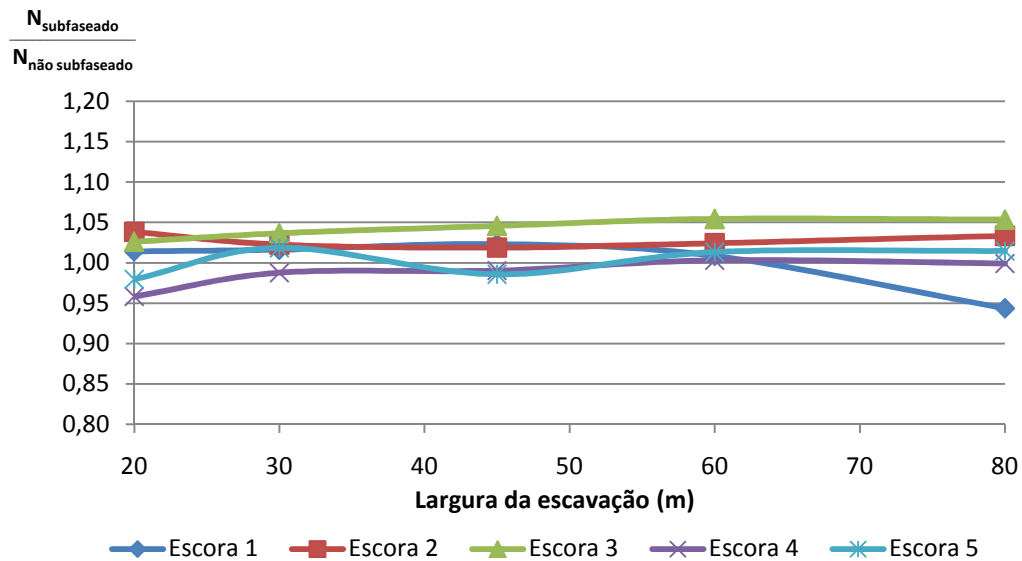


Figura 3.54 – Variação do esforço axial das escoras em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – EP

Verifica-se que a diferença entre os esforços axiais das escoras na escavação subfaseada e a escavação não subfaseada é mínima, não variando mais do que 5%. Tal pode ser explicado pelo facto de as pressões de terra do maciço a ser suportado não depender do subfaseamento da escavação, ou seja, as pressões de terras apenas dependem da profundidade da escavação e da rigidez das escoras que é mantida constante nas análises efectuadas neste trabalho.

Os momentos flectores máximos nas cortinas do lado direito e esquerdo estão apresentados no Quadro 3.9.

Quadro 3.9 – Valores máximos dos momentos flectores – EP
(valores em kNm/m)

Largura		20 m	30 m	45 m	60 m	80 m
Lado Esquerdo	Não subfaseada	-2367,9	-2722,8	-3114,3	-3395,2	-3664,7
	Subfaseada	-2790,9	-3138,3	-3549,9	-3825,9	-4114,8
Lado Direito	Não subfaseada	-2369,7	-2722,6	-3113,6	-3394,6	-3662,3
	Subfaseada	-2361,0	-2648,8	-3023,9	-3259,0	-3517,6

Como era de esperar, na escavação não subfaseada os valores dos momentos são iguais em ambos os lados, sendo as pequenas diferenças devidas à imprecisão do cálculo. No entanto, é possível ver que existem significativas diferenças de momentos flectores no lado esquerdo e direito para a escavação subfaseada.

Do lado direito, os momentos são menores na escavação subfaseada comparativamente à escavação não subfaseada, e essa redução é maior para maiores larguras de escavação, como mostra a Figura 3.55. Pelo contrário, do lado esquerdo há um aumento dos momentos flectores em relação à escavação não subfaseada. No entanto, esse aumento é tanto menor quanto maior for a largura de escavação.

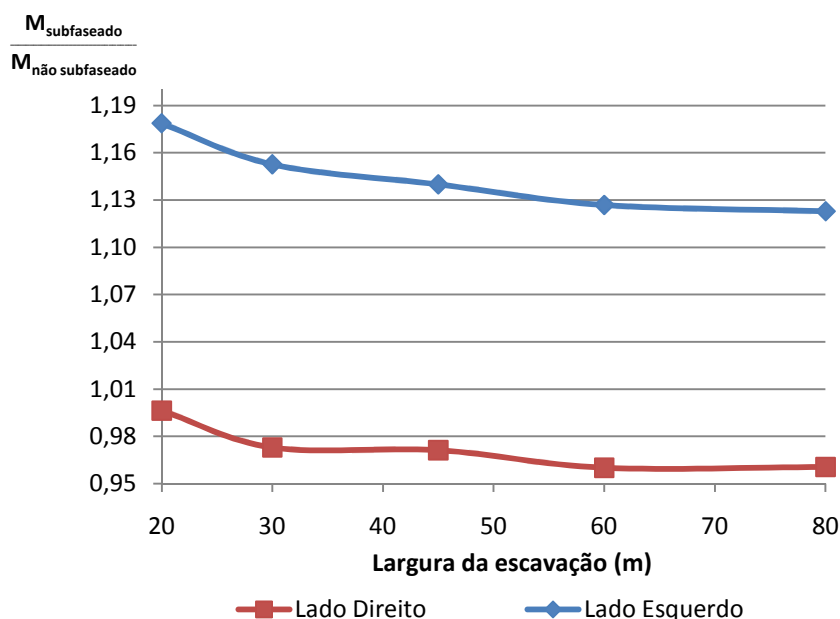


Figura 3.55 – Variação dos momentos flectores em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – EP

3.5. ANÁLISE DE RESULTADOS – CÁLCULOS COMPLEMENTARES

3.5.1. CÁLCULOS COM O SOLO MAIS RÍGIDO ($E_u = 800c_u$)

No subcapítulo anterior foi considerada a rigidez do solo igual a $400c_u$. Para analisar a influência da rigidez do solo no subfaseamento da escavação, foi modelada a mesma escavação em que os aluviões de argila têm uma rigidez de $800c_u$. Assim, apresentam-se no Quadro 3.10 os novos valores dos parâmetros utilizados para este cálculo.

Quadro 3.10 – Parâmetros de entrada no modelo com $800c_u$ – EP

Solo	Profundidade (m)	γ (kN/m ³)	K_0	c_u (kPa)	E_u (MPa)	ν_u
Aluviões argilosas	0-5	18	0,6	37	29,6	0,49
	5-10	18	0,6	37	29,6	0,49
	10-15	18	0,6	45	36,0	0,49
	15-20	18	0,6	54	43,2	0,49
	20-27,5	18	0,6	62	49,6	0,49
Substrato miocénico	27,5-33,5	21,5	0,6	300	150,0	0,49
	33,5-50	21,5	0,6	400	500,0	0,49

As análises foram efectuadas apenas para a largura de 80 m.

Uma vez que o comportamento do solo com esta rigidez, em termos qualitativos, é semelhante ao comportamento que este tem com uma rigidez de $400c_u$, apenas se mostram os valores máximos obtidos na modelação. Assim, no Quadro 3.11 apresentam-se os resultados da escavação num solo com rigidez de $800c_u$.

Quadro 3.11 – Resumo dos resultados da escavação no solo com rigidez $800c_u - 80.EP$

		Não subfaseada	Subfaseada	Diferença
Deslocamento máximo da cortina (mm)	Esquerda	123	148	20%
	Direita	123	111	-10%
Assentamento máximo da superfície (mm)	Esquerda	85	75	-12%
	Direita	85	107	26%
Momento flector máximo da cortina (kNm/m)	Esquerda	-2964	-3566	20%
	Direita	2968	2694	-9%
Esforço axial máximo (kN/m)	Escora 1	-293	-301	3%
	Escora 2	-562	-595	6%
	Escora 3	-630	-667	6%
	Escora 4	-483	-483	0%
	Escora 5	-172	-174	1%

Comparando ambas as escavações é possível verificar que com maior rigidez do solo o subfaseamento da escavação reduz ainda mais os deslocamentos da cortina do lado direito, assim como os assentamentos da superfície. Os momentos da cortina do lado direito também têm uma redução maior comparativamente à escavação no maciço com rigidez de $400c_u$.

3.5.2. CÁLCULOS COM AS ESCORAS COM PRÉ-ESFORÇO CONVENCIONAL

Sendo o pré-esforço convencional do escoramento dos melhores métodos na redução de deslocamentos associados à escavação, decidiu-se verificar o efeito do subfaseamento da escavação juntamente com a aplicação de pré-esforço convencional nas escoras.

Aplicando uma carga de 200 kN/m de pré-esforço aquando a colocação do primeiro nível de escoras e uma carga de 400 kN/m nos níveis de escoramento seguintes, obtiveram-se os valores máximos apresentados no Quadro 3.12.

Quadro 3.12 – Resumo dos resultados da escavação com pré-esforço convencional nas escoras – 80.EP

		Não subfaseada	Subfaseada	Diferença
Deslocamento máximo da cortina (mm)	Esquerda	102	109	7%
	Direita	102	101	-1%
Assentamento máximo da superfície (mm)	Esquerda	60	65	8%
	Direita	60	59	-2%
Momento flector máximo da cortina (kNm/m)	Esquerda	-2329	-2534	9%
	Direita	2329	2300	-1%
Esforço axial máximo (kN/m)	Escora 1	-435	-302	-31%
	Escora 2	-662	-597	-19%
	Escora 3	-642	-534	-17%
	Escora 4	-552	-490	-11%
	Escora 5	-491	-450	-8%

As diferenças no que respeita aos deslocamentos entre os valores obtidos na escavação não subfaseada e na escavação subfaseada são mínimos, o que pode ser explicado pelo facto de o pré-esforço convencional aplicado ser bastante superior ao pré-esforço provocado pelo subfaseamento da escavação.

3.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com as análises apresentadas foi possível verificar que o pré-esforço através do subfaseamento da escavação revela resultados favoráveis na redução dos deslocamentos da cortina associados à escavação, assim como os assentamentos da superfície de um dos lados, no qual poderá existir estruturas vizinhas sensíveis a movimentos.

Os esforços axiais nas escoras não variam significativamente com o subfaseamento da escavação. No entanto, há um aumento dos momentos flectores na cortina do lado contrário à qual se pretende minimizar os deslocamentos, que poderá obrigar à utilização de cortinas mais resistentes do que numa escavação não subfaseada.

Verifica-se ainda que em solos com maior rigidez o efeito do subfaseamento da escavação é mais notório. E que a aplicação de pré-esforço convencional das escoras juntamente com o subfaseamento pode, caso a força de pré-esforço seja elevada, reduzir o efeito do pré-esforço por subfaseamento da escavação.

4

ANÁLISES COM UM MODELO CONSTITUTIVO COM A RIGIDEZ DEPENDENTE DA TRAJECTÓRIA DE TENSÕES

4.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No capítulo anterior considerou-se que o solo seguia uma lei constitutiva elástico-perfeitamente plástica. Neste capítulo será feita uma análise semelhante à do capítulo anterior mas em que o solo segue uma lei não linear com a rigidez dependente da trajectória de tensões, utilizando o modelo *hardening soil* (HS).

O modelo *hardening soil* permite uma representação do comportamento do solo muito mais próxima da realidade, especialmente na simulação de ciclos de carga e descarga, impostos pelas sucessivas fases de escavação e aplicação de pré-esforço nos elementos de apoio.

A não linearidade é conseguida pela variação do módulo de Young entre os incrementos de tensão e extensão. Um dos modelos bem conhecidos desta categoria é o modelo de Duncan-Chang (1970), também conhecido como modelo hiperbólico. Este modelo foi depois reformulado aparecendo o modelo *hardening soil* (Schanz et al., 1999). Este novo modelo supera o modelo hiperbólico pela utilização da teoria da plasticidade em vez da teoria da elasticidade, inclui a dilatação do solo e introduz a superfície de cedência por compressão, que leva a uma região elástica fechada.

O modelo *hardening soil* é um modelo elastoplástico, cuja superfície de cedência não é fixa no espaço das tensões principais, podendo expandir, ocorrendo durante essa expansão deformações plásticas irreversíveis. Durante a expansão da superfície de cedência podem ocorrer dois tipos de endurecimento: o endurecimento por corte, utilizado para modelar as deformações plásticas causadas por um incremento das tensões de desvio e o endurecimento por compressão, que modela as deformações plásticas causadas por uma compressão primária num carregamento isotrópico.

As principais características do modelo *hardening soil* são (Raposo, 2008):

- a capacidade de variação da rigidez do solo com a tensão de confinamento (através do parâmetro m);
- a consideração de deformações plásticas provocadas por incrementos de tensão de desvio (através do parâmetro E_{50});
- a consideração de deformações plásticas devidas a incrementos de tensão isotrópica (através do parâmetro E_{oed});

- a possibilidade de utilização de valores diferentes da deformabilidade consoante se trate de uma trajetória de tensões de primeira carga ou de descarga-recarga (por intermédio dos factores E_{ur} e ν_{ur});
- a utilização da envolvente de rotura de acordo com o critério de Mohr-Coulomb (considerando os valores de c' , φ' e ψ).

A ideia base da formulação do modelo *hardening soil* é a relação hiperbólica entre a deformação axial ε_1 , e a tensão de desvio q , num ensaio triaxial drenado. Esta relação pode ser descrita pela expressão:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} \quad \text{para } q < q_f \quad (4.1)$$

em que q_a representa a assíntota da hipérbole e q_f o valor máximo da tensão de desvio (tensão de rotura obtida no ensaio).

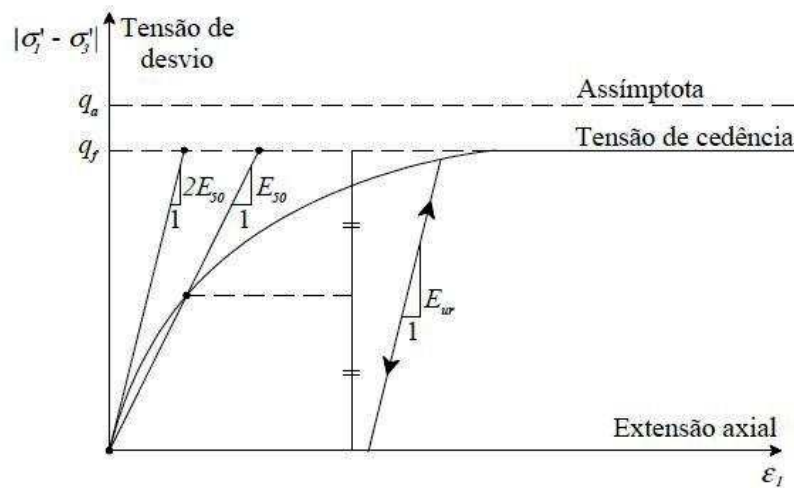


Figura 4.1 – Relação hiperbólica entre a tensão primária e a extensão num ensaio triaxial drenado

O valor de q_f é dado pela expressão:

$$q_f = 2 \times c_u \quad (4.2)$$

Esta expressão para q_f deriva da envolvente de rotura de Mohr-Coulomb, ficando $c = c_u$ e $\varphi' = 0$. Quando a tensão de desvio atinge o valor de q_f , o critério de rotura é satisfeito e o escoamento perfeitamente plástico ocorre. O quociente entre q_f e q_a é dado pelo parâmetro R_f que deve ser menor que a unidade. O valor de 0,9 para este parâmetro é adequado para a maioria dos casos. A relação hiperbólica é mostrada na Figura 4.1.

O módulo de deformabilidade secante para uma tensão de desvio correspondente a metade da tensão de desvio máxima corresponde ao valor de E_{50} , que para $\varphi' = 0$ é igual ao valor de E_{50}^{ref} . Este é o módulo de Young correspondente à carga de referência p^{ref} .

De forma a ser mais preciso que o modelo elástico-perfeitamente plástico, o modelo *hardening soil* utiliza uma rigidez diferente para a trajectória de descarga e recarga, E_{ur} , que para $\varphi' = 0$ é igual E_{ur}^{ref} . Este último é o módulo de Young de referência em descarga ou recarga determinado com base numa tensão efectiva de confinamento p^{ref} .

Para as cargas de referência p^{ref} é normalmente utilizado o valor de 100 kPa.

4.2. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO *HARDENING SOIL*

Uma vez que o modelo *hardening soil* necessita de mais parâmetros de entrada, foi necessário arbitrar alguns que mais tarde se verificou serem válidos. O valor de E_{50} e $c_{u,ref}$ admitiram-se iguais aos valores de E_u e c_u do modelo elástico-perfeitamente plástico, respectivamente. O módulo de deformabilidade do descarregamento e recarregamento, E_{ur} , considerou-se o triplo do valor de E_{50} , e o módulo edométrico é determinado pela seguinte expressão:

$$E_{eod} = \frac{E_{50} \times (1-\nu)}{(1+\nu) \times (1-2\nu)} \quad (4.3)$$

A modelação de ensaios triaxiais de compressão por aumento da tensão vertical (neste trabalho denominada de compressão 1) dos vários estratos que compõem o solo permitiu verificar se o seu comportamento é próximo do modelo linear. Para isso, criou-se um modelo axissimétrico com uma malha de elementos finitos de dimensões unitárias, como mostra a Figura 4.2.

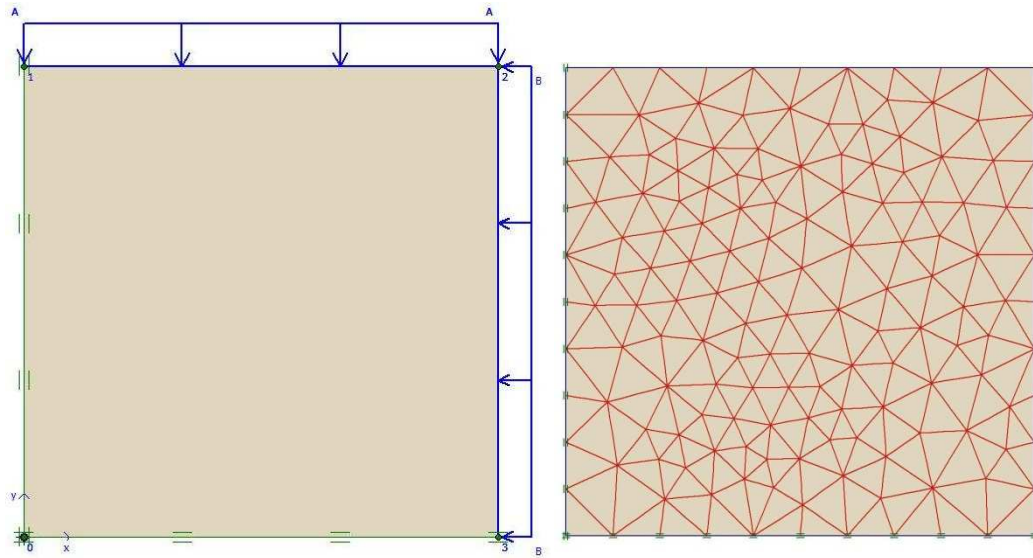


Figura 4.2 – Modelo de elementos finitos do ensaio triaxial

Na primeira fase aplicou-se a carga uma carga vertical de 100 kPa e uma carga horizontal de 78 kPa para simular a consolidação tipo K_0 em tensões totais. Concluída esta consolidação, procedeu-se ao incremento da tensão vertical, aplicou-se um ciclo de descarga e recarga da tensão vertical e por fim levou-se a amostra à rotura por incremento da mesma tensão.

No Quadro 4.1 apresentam-se os parâmetros utilizados no modelo elástico-perfeitamente plástico e no Quadro 4.2 são mostrados os parâmetros de entrada utilizados no programa de cálculo para o modelo *hardening soil*.

Quadro 4.1 – Parâmetros de entrada no modelo linear ($400c_u$)

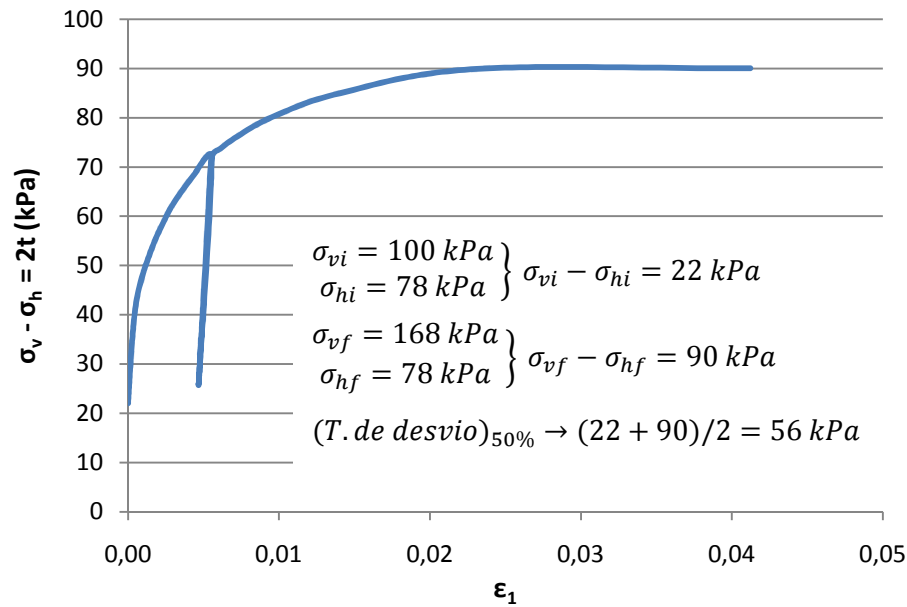
Solo	Profundidade (m)	γ (kN/m ³)	K_0	c_u (kPa)	E_u (MPa)	E_{ur}/c_u	ν_u
Aluviões argilosas	0-5	18	0,6	37	14,8	400	0,49
	5-10	18	0,6	37	14,8	400	0,49
	10-15	18	0,6	45	18	400	0,49
	15-20	18	0,6	54	21,6	400	0,49
	20-27,5	18	0,6	62	24,8	400	0,49
Substrato miocénico	27,5-33,5	21,5	0,6	300	150	500	0,49
	33,5-50	21,5	0,6	400	500	1250	0,49

Quadro 4.2 – Parâmetros de entrada no modelo *hardening soil* ($400c_u$)

Solo	Profundidade (m)	E_{50} (MPa)	E_{oed} (MPa)	E_{ur} (MPa)	m	$c_{u,ref}$ (kPa)	ϕ'	ψ	R_f
Aluviões argilosas	0-5	14,8	253,3	44,4	0	37	0	0	0,9
	5-10	14,8	253,3	44,4	0	37	0	0	0,9
	10-15	18,0	308,1	54,0	0	45	0	0	0,9
	15-20	21,6	369,7	64,8	0	54	0	0	0,68
	20-27,5	24,8	424,4	74,4	0	62	0	0	0,72
Substrato miocénico	27,5-33,5	150,0	2567,1	450,0	0	300	0	0	0,9
	33,5-50	500,0	8557,0	1500,0	0	400	0	0	0,9

É de notar que o segundo estrato é igual ao primeiro. Sendo assim, para o segundo estrato não foi modelado o ensaio triaxial, assumindo os valores do primeiro.

O resultado da modelação é uma curva de carga-extensão, a partir da qual é possível determinar os módulos de deformabilidade de carregamento inicial, E_{50} , o módulo de deformabilidade de descarga-recarga, E_{ur} , e a tensão de corte máxima, c_u . Na Figura 4.3 é mostrado o resultado da modelação do ensaio triaxial do estrato 3.

Figura 4.3 – Resultado do ensaio triaxial de compressão 1 do estrato 3 (400c_u)

Com esta curva determinou-se o valor de E_{50} na primeira carga para uma tensão de desvio de 56 kPa, que corresponde uma extensão de 0,19%, obtendo-se o valor de 17,8 MPa. O valor de E_{ur} é obtido no recarregamento de 27 kPa (0,47% de extensão) até 37 kPa (0,49% de extensão) resultando o valor de 54 MPa. A tensão tangencial de rotura, c_u , é metade da tensão máxima da curva, ou seja, 45 kPa.

Modelando o ensaio triaxial de cada um dos estratos com os parâmetros no Quadro 4.2 obtiveram-se os valores que se mostram no Quadro 4.3.

Quadro 4.3 – Resultados da modelação dos ensaios triaxiais de compressão 1 (400c_u)

Solo	Profundidade (m)	E_{50} (MPa)	E_{50}/c_u	E_{ur} (MPa)	E_{ur}/E_{50}	c_u (kPa)
Aluviões argilosas	0-5	14,4	389	44,4	3,1	37
	5-10	14,4	389	44,4	3,1	37
	10-15	17,8	396	54,0	3,0	45
	15-20	21,5	398	64,8	3,0	54
	20-27,5	24,7	398	74,4	3,0	62
Substrato miocénico	27,5-33,5	154,0	513	450,0	2,9	300
	33,5-50	502,3	1256	1500,0	3,0	400

Uma vez que os valores obtidos não diferem mais de 5% do pretendido, os parâmetros do Quadro 4.2 serão utilizados na modelação da escavação descrita no capítulo anterior.

Sabendo que o solo atrás da cortina sofre uma diminuição da tensão horizontal, optou-se por fazer também ensaios triaxiais de compressão diminuindo a tensão de confinamento (compressão 2). Os resultados obtidos apresentam-se no Quadro 4.4.

Quadro 4.4 – Resultados da modelação dos ensaios triaxiais de compressão 2 (400c_u)

Solo	Profundidade (m)	E ₅₀ (MPa)	E ₅₀ /c _u	E _{ur} (MPa)	E _{ur} /E ₅₀	c _u (kPa)
Aluviões argilosas	0-5	14,5	391,9	45,3	3,1	37
	5-10	14,5	391,9	45,3	3,1	37
	10-15	19,4	431,1	55,5	2,9	45
	15-20	19,2	355,6	66,1	3,4	54
	20-27,5	21,9	353,2	75,9	3,5	62
Substrato miocénico	27,5-33,5	130,4	434,7	975,8	7,5	300
	33,5-50	321,2	803,0	1530,6	4,8	400

O ensaio de compressão 2 apresenta algumas diferenças em relação ao ensaio de compressão 1, diferenças estas que são mais notórias nos estratos de maior rigidez.

Uma vez que o solo do fundo da escavação sofre uma redução da tensão vertical, resultante da retirada de terras, e ao mesmo tempo um incremento da tensão horizontal, que resulta do deslocamento da cortina para a escavação provocando tensões passivas neste, fizeram-se ainda ensaios triaxiais de extensão por incremento da tensão horizontal (extensão 3) e de extensão por decréscimo da tensão vertical (extensão 4).

Na Figura 4.4 apresenta-se a curva resultante da modelação do ensaio triaxial de extensão por decréscimo da tensão vertical para o estrato dos 10 m aos 15 m de profundidade.

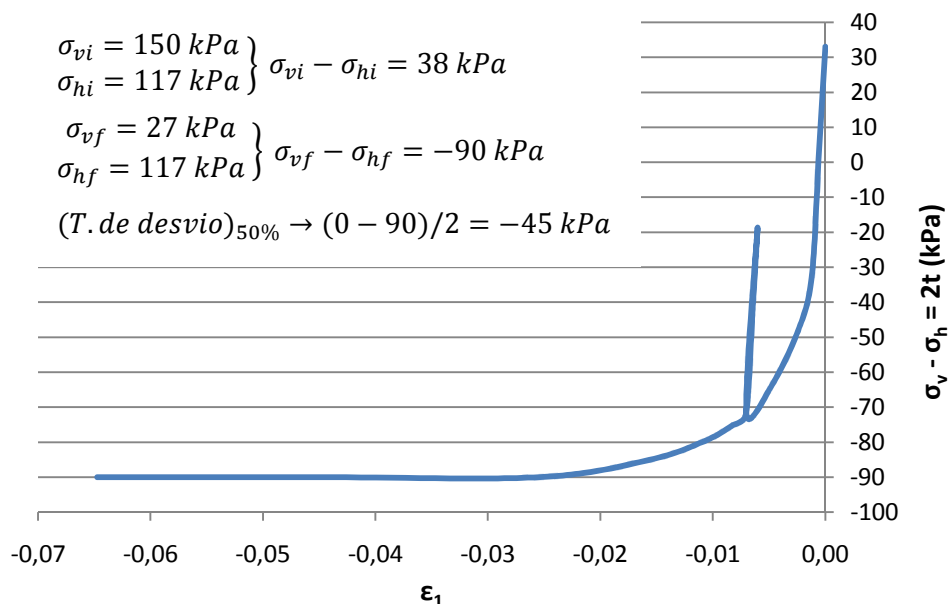


Figura 4.4 – Resultado do ensaio triaxial de extensão 4 do estrato 3

Repare-se que inicialmente a tensão vertical é superior à tensão horizontal. Por isso, ao ser descarregado o solo assume a rigidez de descarga-recarga, e só depois, a partir do momento em que a tensão vertical iguala a tensão horizontal, é que o solo se comporta com rigidez de primeira-carga.

Apresentam-se no Quadro 4.5 os resultados para o ensaio de extensão 3 e no Quadro 4.6 os resultados para o ensaio de extensão 4.

Quadro 4.5 – Resultados da modelação dos ensaios triaxiais de extensão 3 ($400c_u$)

Solo	Profundidade (m)	E_{50} (MPa)	E_{50}/c_u	E_{ur} (MPa)	E_{ur}/E_{50}	c_u (kPa)
Aluviões argilosas	0-5	36,7	991,9	45,3	1,2	37
	5-10	36,7	991,9	45,3	1,2	37
	10-15	23,8	528,9	55,1	2,3	45
	15-20	37,1	687,0	66,1	1,8	54
	20-27,5	39,6	638,7	75,9	1,9	62
Substrato miocénico	27,5-33,5	210,3	701,0	1125,0	5,3	300
	33,5-50	554,4	1108,8	1530,6	2,8	400

Quadro 4.6 – Resultados da modelação dos ensaios triaxiais de extensão 4 ($400c_u$)

Solo	Profundidade (m)	E_{50} (MPa)	E_{50}/c_u	E_{ur} (MPa)	E_{ur}/E_{50}	c_u (kPa)
Aluviões argilosas	0-5	23,2	627,0	44,4	1,9	37
	5-10	23,2	627,0	44,4	1,9	37
	10-15	28,6	635,6	54,0	1,9	45
	15-20	33,3	616,7	64,8	1,9	54
	20-27,5	31,0	500,0	74,4	2,4	62
Substrato miocénico	27,5-33,5	227,6	758,7	450,0	2,0	300
	33,5-50	568,6	1421,5	1500,0	2,6	400

Os valores obtidos para os ensaios de extensão 3 apresentam diferenças significativas em relação aos valores pretendidos. Já os resultados do ensaio de extensão 4 estão mais próximos dos valores desejados.

4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS – ESCAVAÇÃO COM LARGURA DE 80 M

4.3.1. MOVIMENTOS ASSOCIADOS

Analise-se agora os movimentos provocados pela escavação com 80 m de largura considerando o modelo *hardening soil* como modelo constitutivo do solo.

Os deslocamentos horizontais da cortina estão ilustrados na Figura 4.5.

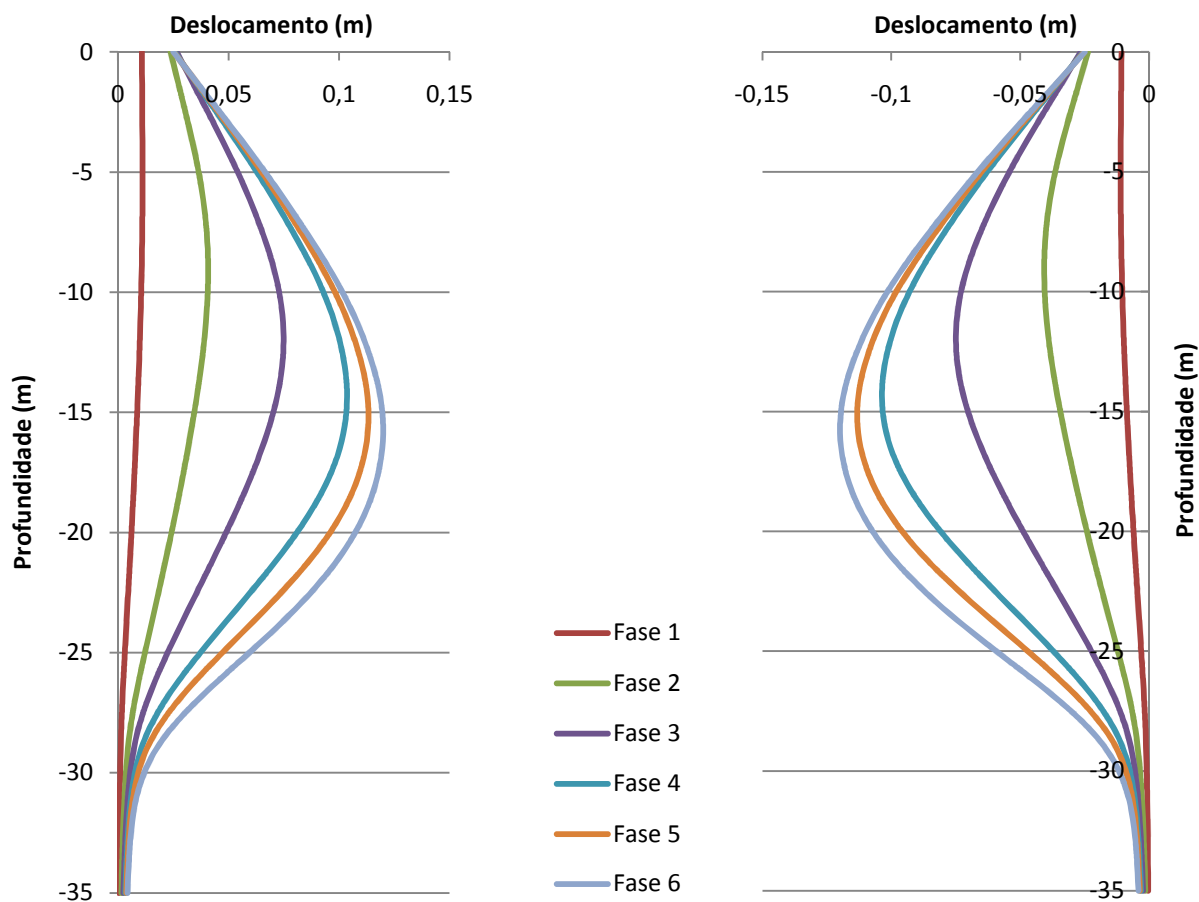


Figura 4.5 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.HS.NF

O comportamento da estrutura, obviamente, não difere qualitativamente da análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico feita no capítulo anterior, apenas se verificando pequenas diferenças nos valores obtidos que serão explicadas e justificadas mais à frente.

Para esta análise, o valor máximo no topo da cortina é de 27 mm na fase 3, e o valor máximo de deslocamento obtido foi de 120 mm a 15,6 m de profundidade.

Para escavação subfaseada, os deslocamentos horizontais da cortina estão representados na Figura 4.6.

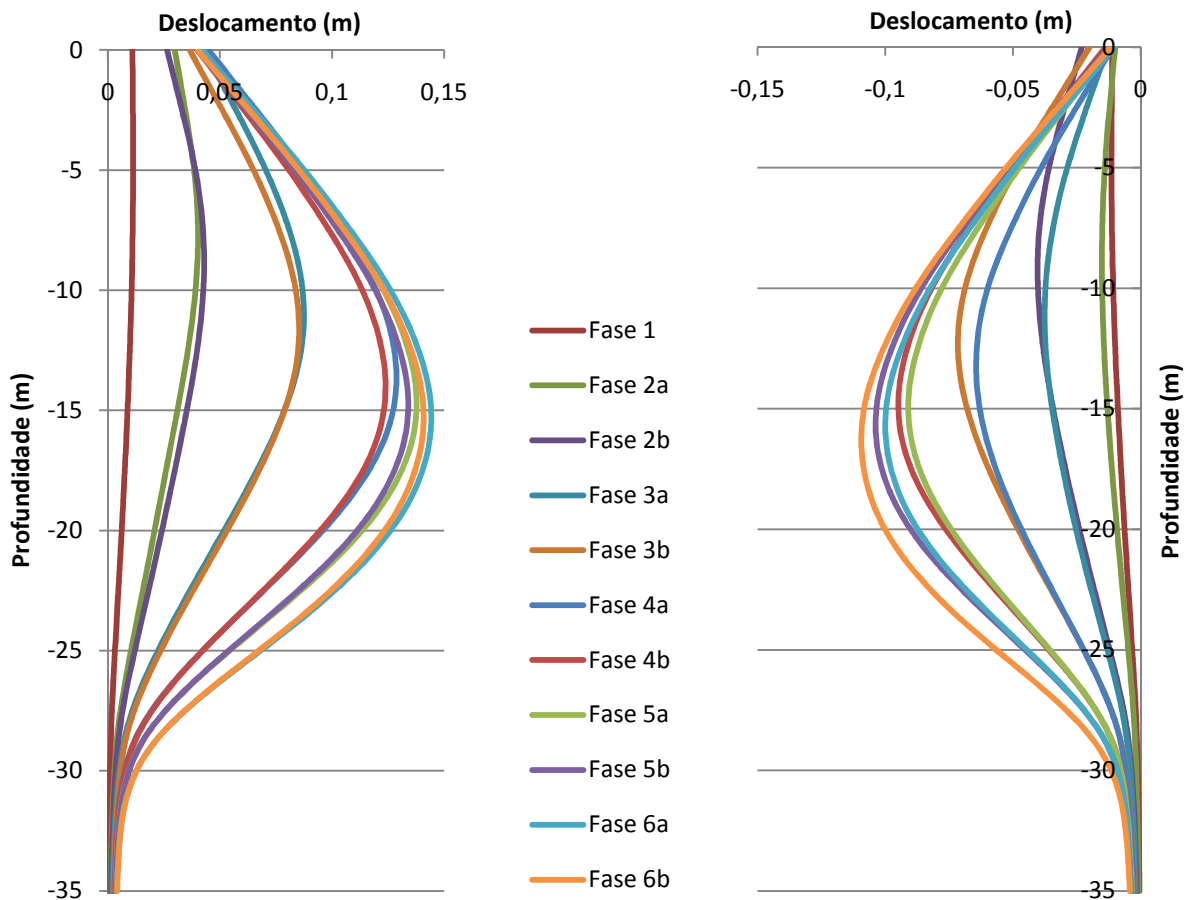


Figura 4.6 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.HS.SF

O deslocamento máximo no topo da cortina do lado esquerdo é 45 mm e 23 mm do lado direito. Do lado esquerdo resultou um deslocamento máximo da cortina de 144 mm e do lado direito um deslocamento máximo de 109 mm.

Analisando estes resultados, verifica-se um menor deslocamento do lado direito da escavação em relação à escavação não subfaseada, com uma diminuição de 10% do deslocamento máximo mas com um aumento de 20% do lado esquerdo.

Uma vez que a escavação é simétrica, os deslocamentos verticais da superfície do maciço para a escavação não faseada são idênticos à esquerda e à direita. Por esse motivo, apenas se apresenta os perfis de assentamento de um dos lados desta escavação, que se encontram na Figura 4.7. O valor máximo resultante deste cálculo foi de 86 mm.

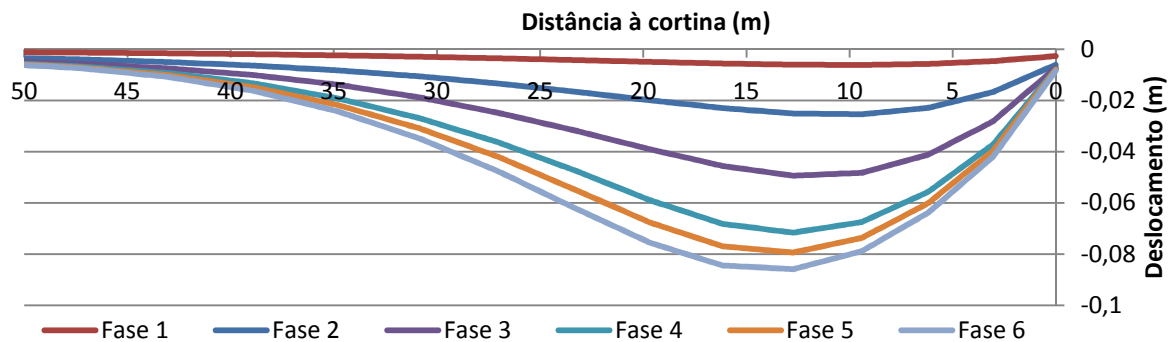


Figura 4.7 – Assentamentos da superfície – 80.HS.NF

O comportamento da superfície é semelhante ao do modelo elástico-perfeitamente plástico, apresentando na análise com o modelo *hardening soil* um deslocamento inferior à escavação analisada no capítulo anterior.

A escavação subfaseada resulta nos perfis de deslocamentos verticais da Figura 4.8, em que em cima está o lado esquerdo da escavação e em baixo o lado direito.

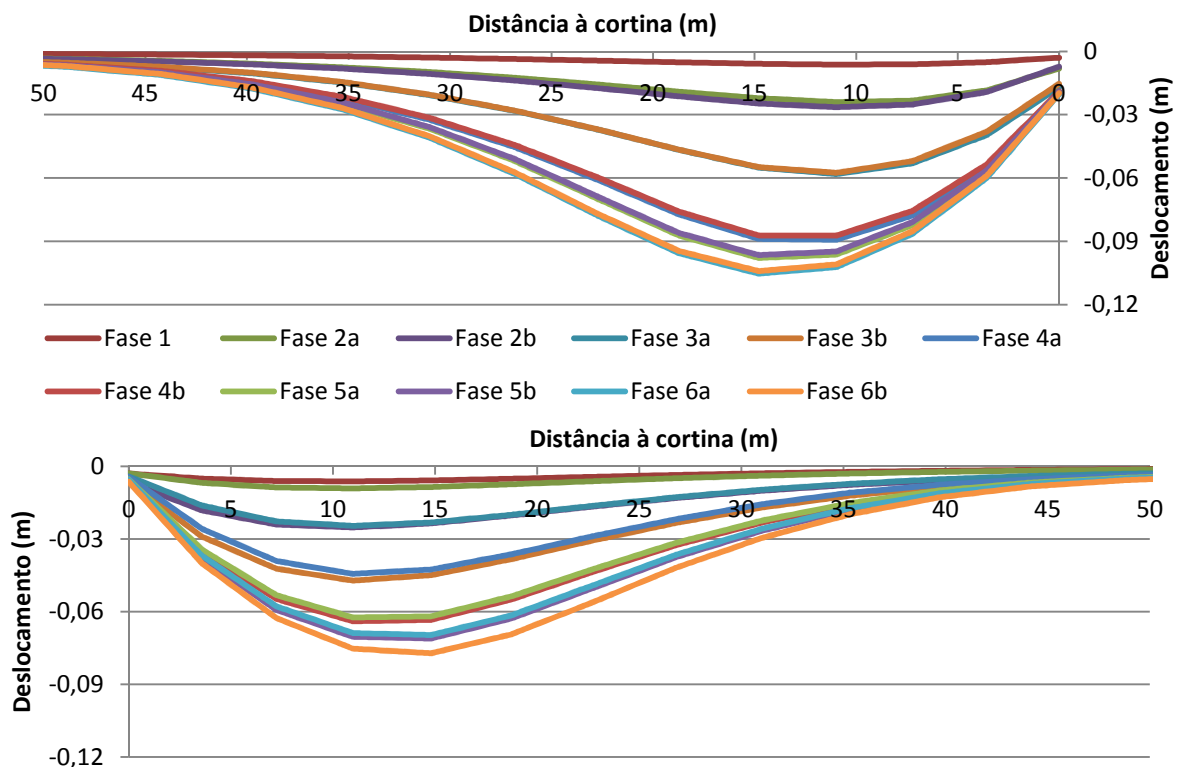


Figura 4.8 – Assentamentos da superfície – 80.HS.SF

Desta escavação resultam os valores de deslocamento máximo para os lados esquerdo e direito de, respectivamente, 105 mm e 77 mm. Assim, registou-se uma redução do assentamento do lado direito de 10% devido ao subfaseamento da escavação.

4.3.2. ESTADO DE TENSÃO

Tal como para a análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico, foram analisadas as trajectórias de tensões para os mesmos pontos. As trajectórias obtidas apresentam-se Figuras 4.9 a 4.12.

Como era de esperar, as trajectórias de tensões na análise com o modelo *hardening soil* são similares às da análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico estudado no capítulo anterior.

Uma primeira nota sobre a análise com este modelo constitutivo é o facto de que com esta, as tensões tangenciais serem menores, chegando mesmo a ser negativa nos pontos A e B. Isto resulta de a tensão horizontal ultrapassar o valor da tensão vertical, por consequência do aumento dos esforços axiais das escoras e por estes dois pontos se encontrarem muito próximos da superfície em que a tensão vertical é baixa, ou seja, o valor da tensão horizontal ultrapassa a tensão vertical nesses pontos, passando esses mesmos pontos a estar em carregamento tendo o comportamento simulado no ensaio de extensão 3.

O facto de as tensões tangenciais serem menores na análise com o modelo *hardening soil* leva a que os pontos C e D não plastifiquem, ao contrário do que se verificou na análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico.

A análise com o modelo *hardening soil* vem confirmar os valores obtidos na análise com o modelo constitutivo elástico-perfeitamente plástico. Do lado direito a tensão tangencial na escavação subfaseada é menor em todas as fases relativamente à escavação não subfaseada, o que resulta em menores deslocamentos desse lado. Do lado esquerdo, a tensão tangencial é maior quando se escava do mesmo lado, resultando em grandes deslocamentos, que não têm uma recuperação significativa uma vez que a rigidez do solo é superior quanto este sofre uma redução da tensão tangencial, o que acontece nas fases em que é escavado o lado direito e há um aumento da tensão horizontal.

Uma outra observação relevante é o facto de as trajectórias de tensões totais corresponderem a ensaios de compressão 2 com vários ciclos de descarga-recarga. O que leva a que os parâmetros do Quadro 4.4 tenham especial importância no comportamento do maciço suportado.

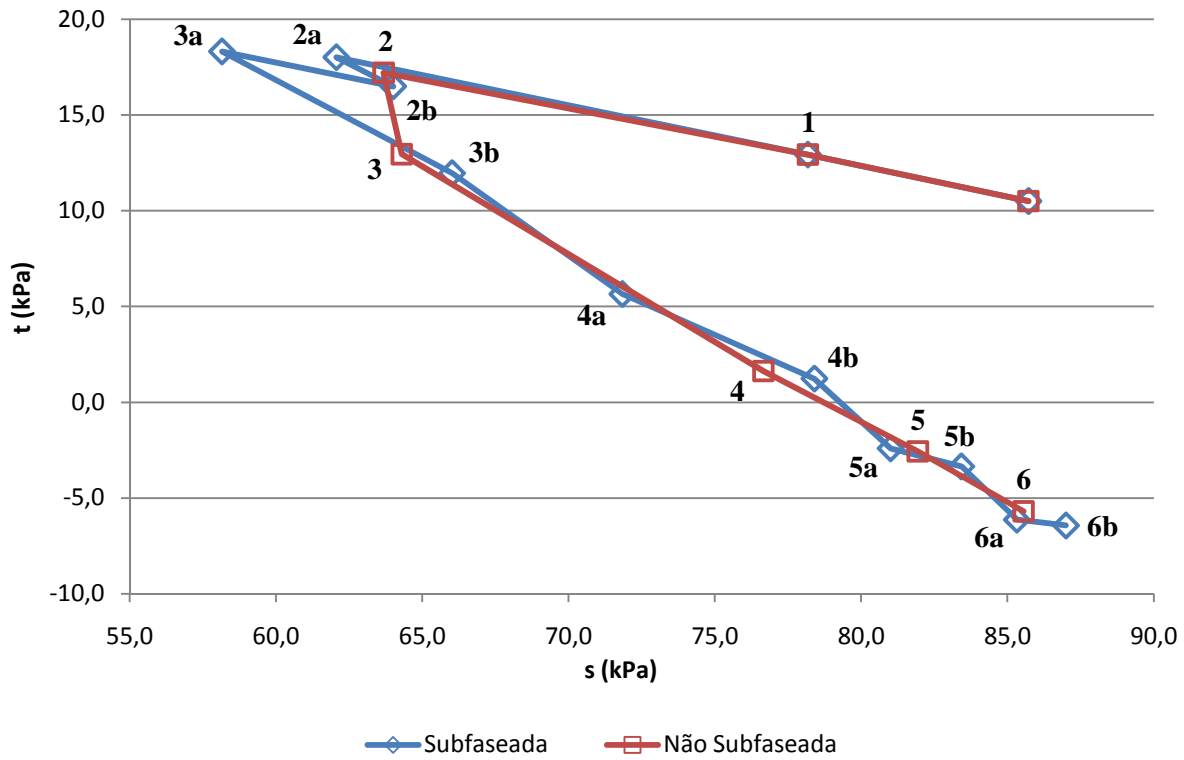


Figura 4.9 – Trajectórias de tensões totais do ponto A – 80.HS

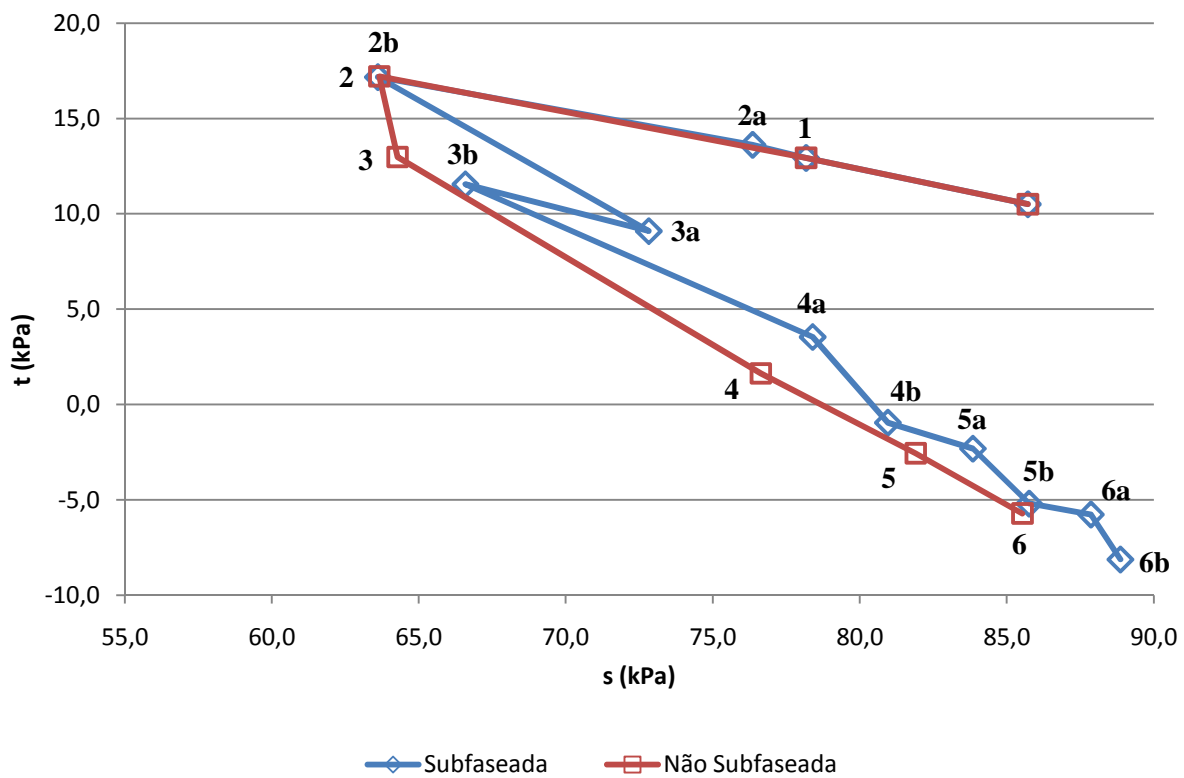


Figura 4.10 – Trajectórias de tensões totais do ponto B – 80.HS

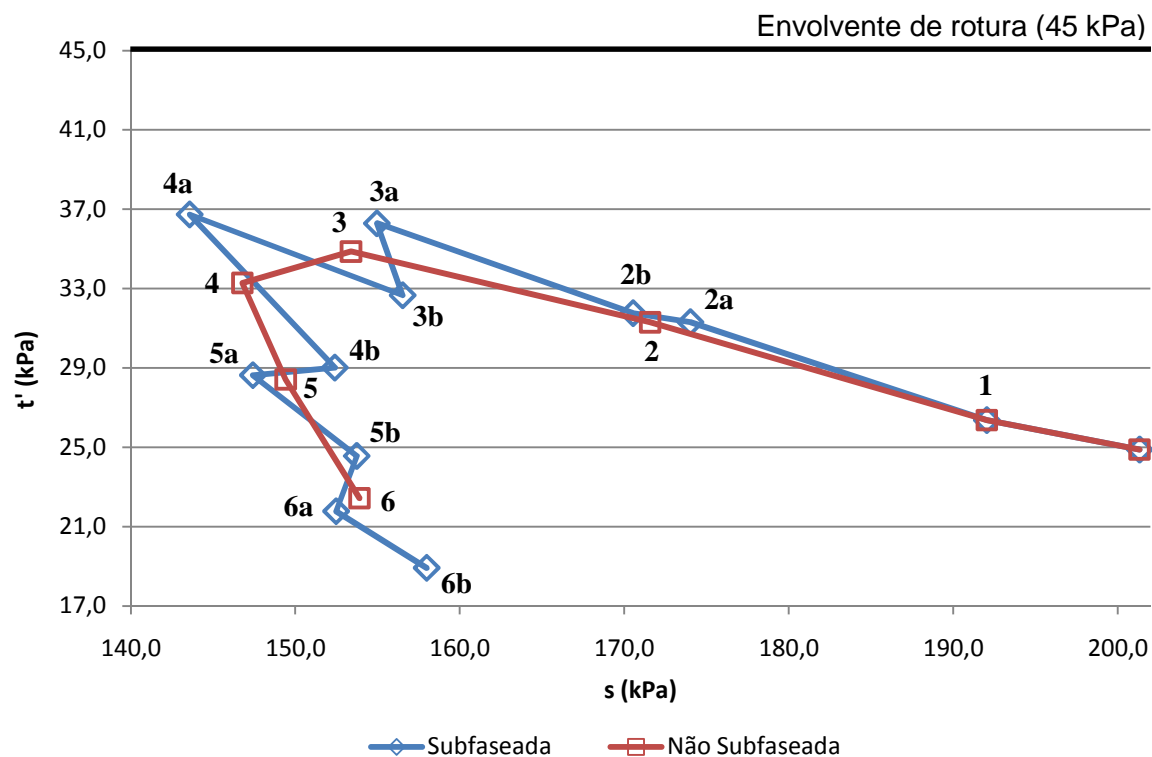


Figura 4.11 – Trajectórias de tensões totais do ponto C – 80.HS

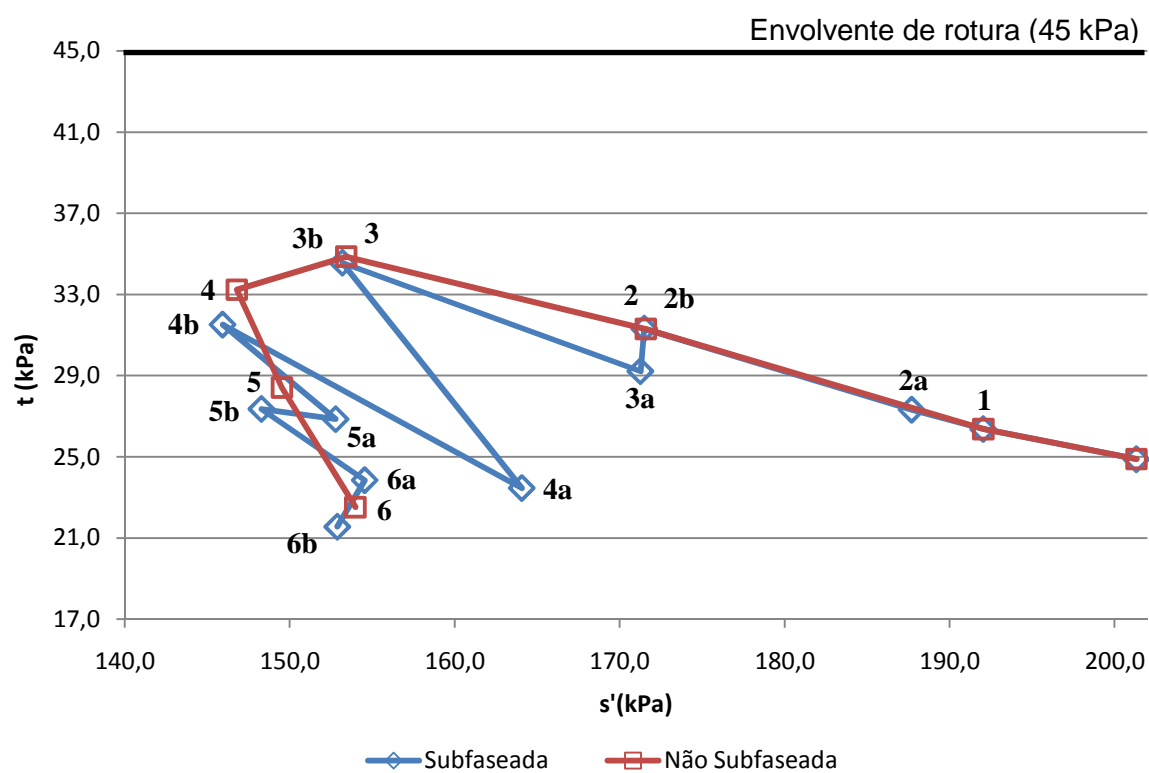


Figura 4.12 – Trajectórias de tensões totais do ponto D – 80.HS

Estudou-se, também para a análise com o modelo *hardening soil*, as tensões horizontais do maciço nas mesmas regiões, conforme ilustram as Figuras 4.13 e 4.14.

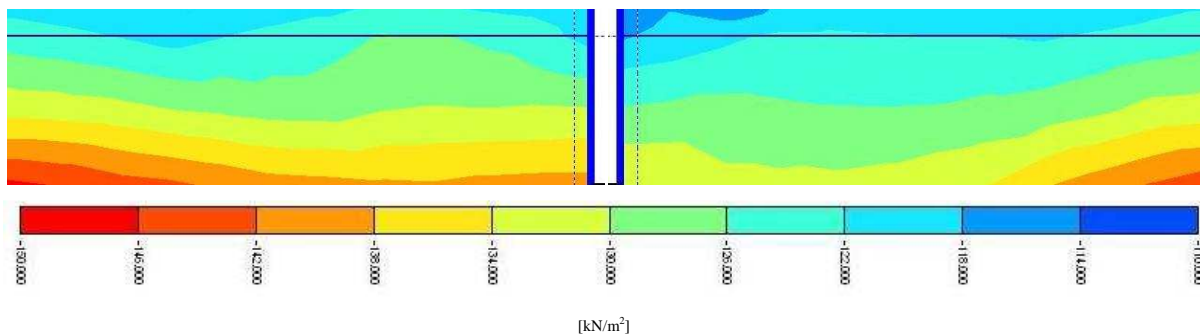


Figura 4.13 – Tensão horizontal das regiões A e B – 80.HS.SF

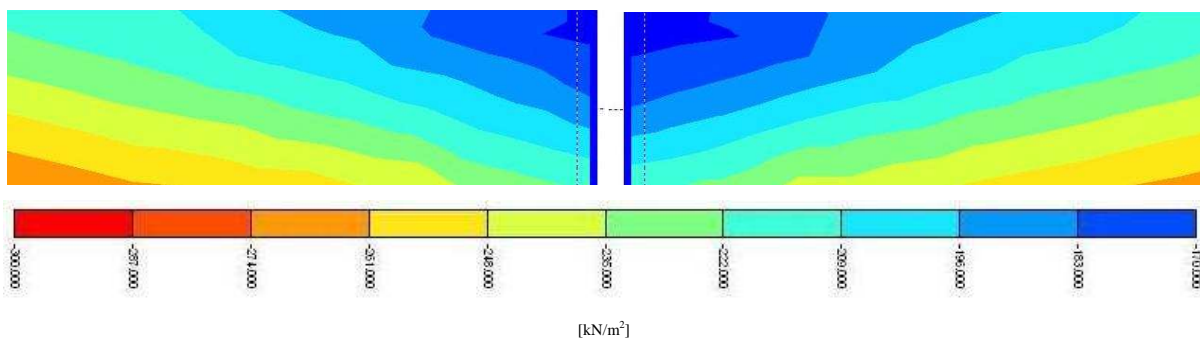


Figura 4.14 – Tensão horizontal das regiões C e D – 80.HS.SF

Analisando a Figura 4.13 é possível verificar que a diferença de tensões horizontais é mais significativa do que na análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico. O motivo pelo qual os resultados da análise com o modelo *hardening soil* revelam maior diferença entre um lado e outro pode ser explicado pelo facto de a rigidez que influencia os resultados é a rigidez de “descarga-recarga”, que na análise com o modelo *hardening soil* é maior.

Com estes diagramas pretende-se mostrar porque é que a diferença dos momentos é maior na análise com o modelo *hardening soil*, que resulta de as diferenças de tensões horizontais entre os dois lados do maciço serem também maiores.

Para uma comparação com a escavação não subfaseada, na Figura 4.15 mostram-se as pressões de terra atrás da cortina para ambos os lados da escavação subfaseada e para um dos lados da escavação não subfaseada.

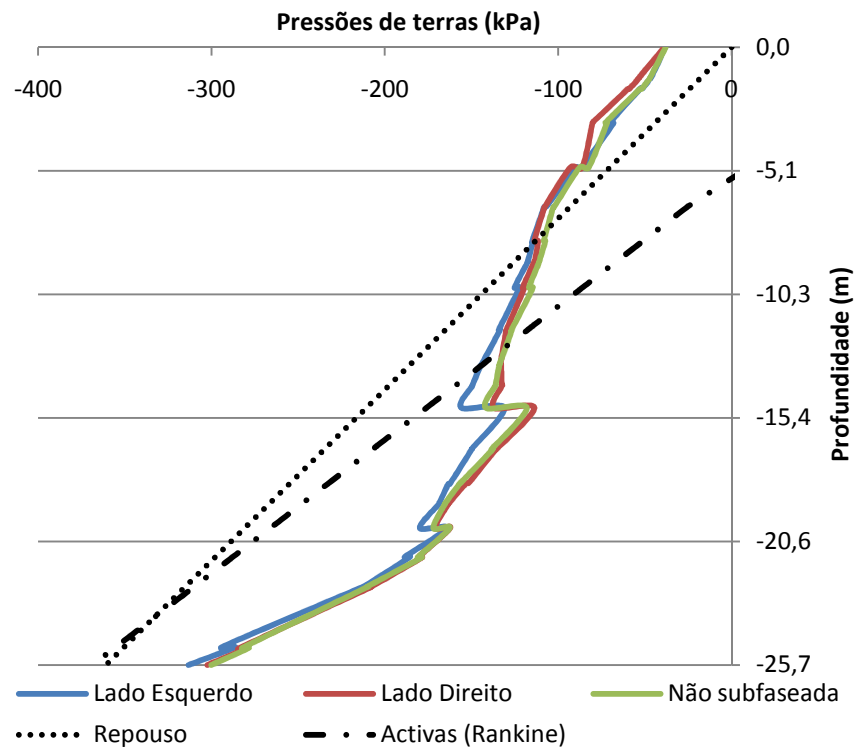


Figura 4.15 – Pressões de terra atrás da cortina – 80.HS

Como é possível verificar, a diferença das pressões de terras entre os dois lados da escavação subfaseada é clara, sendo o lado esquerdo com pressões de terra maiores a partir, aproximadamente, de 8 m de profundidade. Repare-se ainda que a diferença entre as pressões do lado direito da escavação e as da escavação não subfaseada também é mais evidente, resultando assim numa diferença maior entre os momentos do lado direito da escavação subfaseada e da escavação não subfaseada.

Como foi visto na análise do capítulo anterior, o facto de o lado esquerdo ter maiores deslocamentos e mesmo assim ter maiores pressões de terra deve-se à plastificação do solo que, mesmo com o aumento das tensões horizontais, a deformação não é recuperada.

No entanto, nesta análise a diferença entre os dois lados é ainda maior, não só nos deslocamentos como também nas pressões de terra. O que faz com que esta diferença seja maior é a rigidez de descarga-recarga ser maior do que na análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico.

Para melhor entender tal facto observe-se as Figuras 4.16 e 4.17, que mostram a curva de tensão-deformação ao longo da escavação dos pontos C e D, respectivamente.

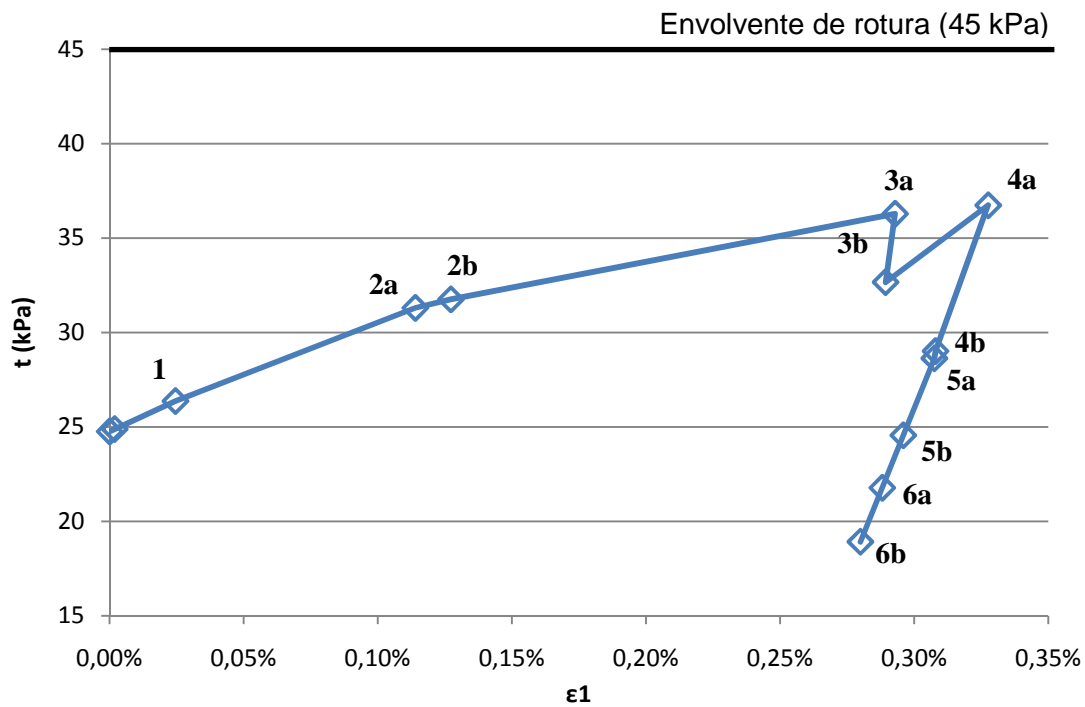


Figura 4.16 – Curva tensão-deformação do ponto C – 80.HS.SF

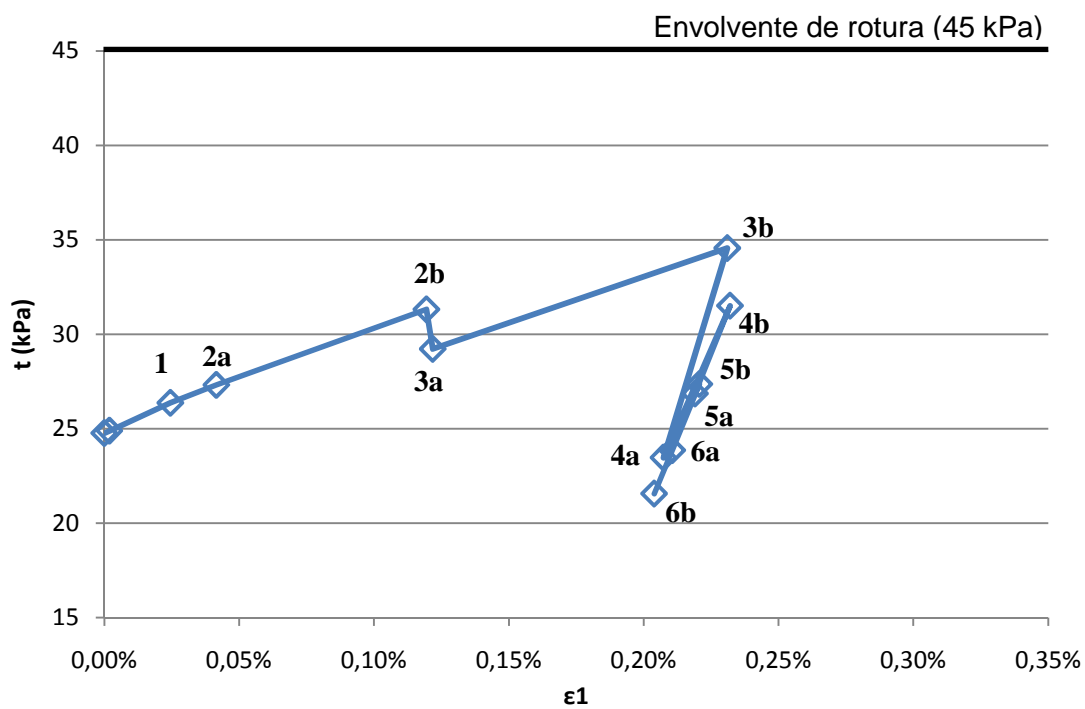


Figura 4.17 – Curva tensão-deformação do ponto D – 80.HS.SF

Pode então verificar-se que nas primeiras fases da escavação o lado esquerdo tem maiores tensões tangenciais, e por isso mesmo maiores deformações, que o lado direito e nas fases finais a tensão tangencial diminui consideravelmente, mas como a rigidez de descarga é maior a deformação não é recuperada. Pelo contrário, o lado direito tem uma diminuição da tensão tangencial uma fase antes do

lado esquerdo e com uma deformação menor. No entanto, com o continuar da escavação a tensão tangencial volta a aumentar mas com rigidez diferente e assim menor deformação, o que leva a no final da escavação a uma menor deformação e a tensões tangenciais maiores, resultando em tensões horizontais menores.

4.3.3. ESFORÇOS ESTRUTURAIS

A variação dos esforços axiais nas escoras na escavação não subfaseada com largura de 80 m está apresentada na Figura 4.18.

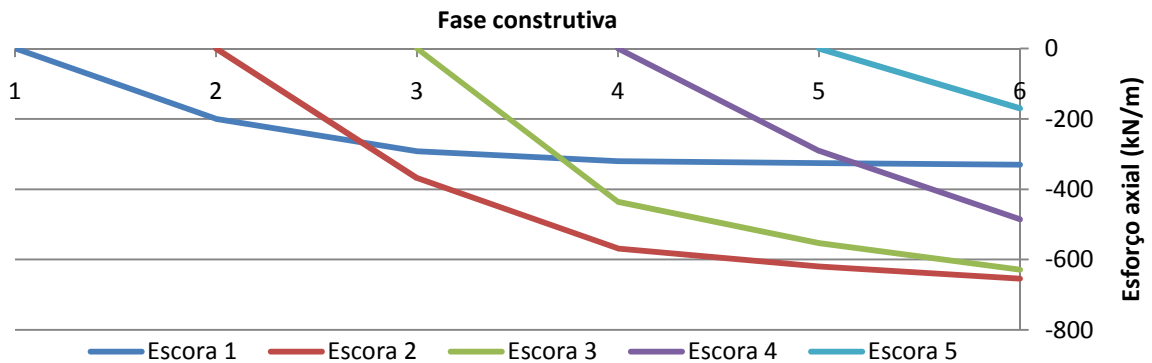


Figura 4.18 – Esforços nas escoras – 80.HS.NF

Os esforços máximos obtidos foram 331 kN/m, 654 kN/m, 629 kN/m, 486 kN/m e 171 kN/m para as escoras de 1 a 5, respectivamente.

Na Figura 4.19 estão representados os valores do esforço axial nas escoras para a escavação subfaseada.

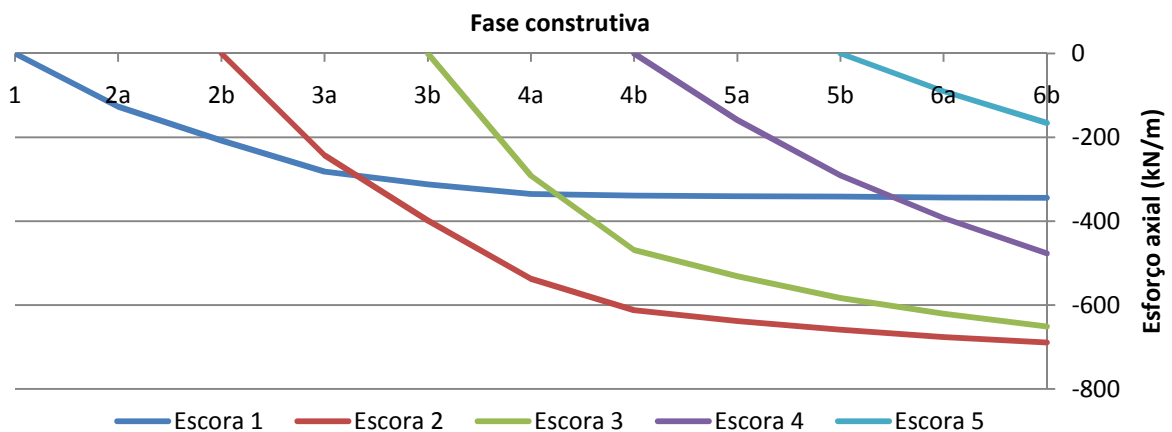


Figura 4.19 – Esforços nas escoras – 80.HS.SF

Os esforços máximos observados nas escoras são, por ordem crescente de níveis, 344 kN/m, 689 kN/m, 652 kN/m, 477 kN/m e 166 kN/m. Verifica-se então que os esforços axiais nas escoras na escavação subfaseada são maiores nos primeiros níveis e menores nos últimos comparativamente à escavação não subfaseada.

No entanto, a diferença de esforços registada entre as duas escavações não é significativa. Esta ligeira diferença é visível no diagrama de pressões aparentes representado na Figura 4.20.

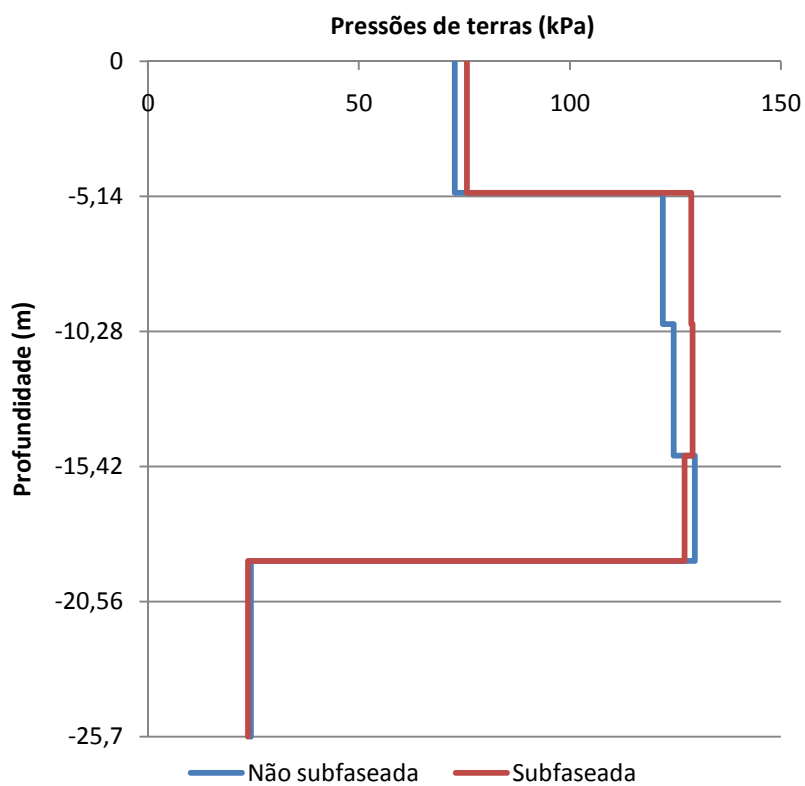


Figura 4.20 – Diagrama de pressões aparentes – 80.HS

Na Figura 4.21 estão representadas as envolventes dos momentos flectores da cortina esquerda e cortina direita para ambas as escavações.

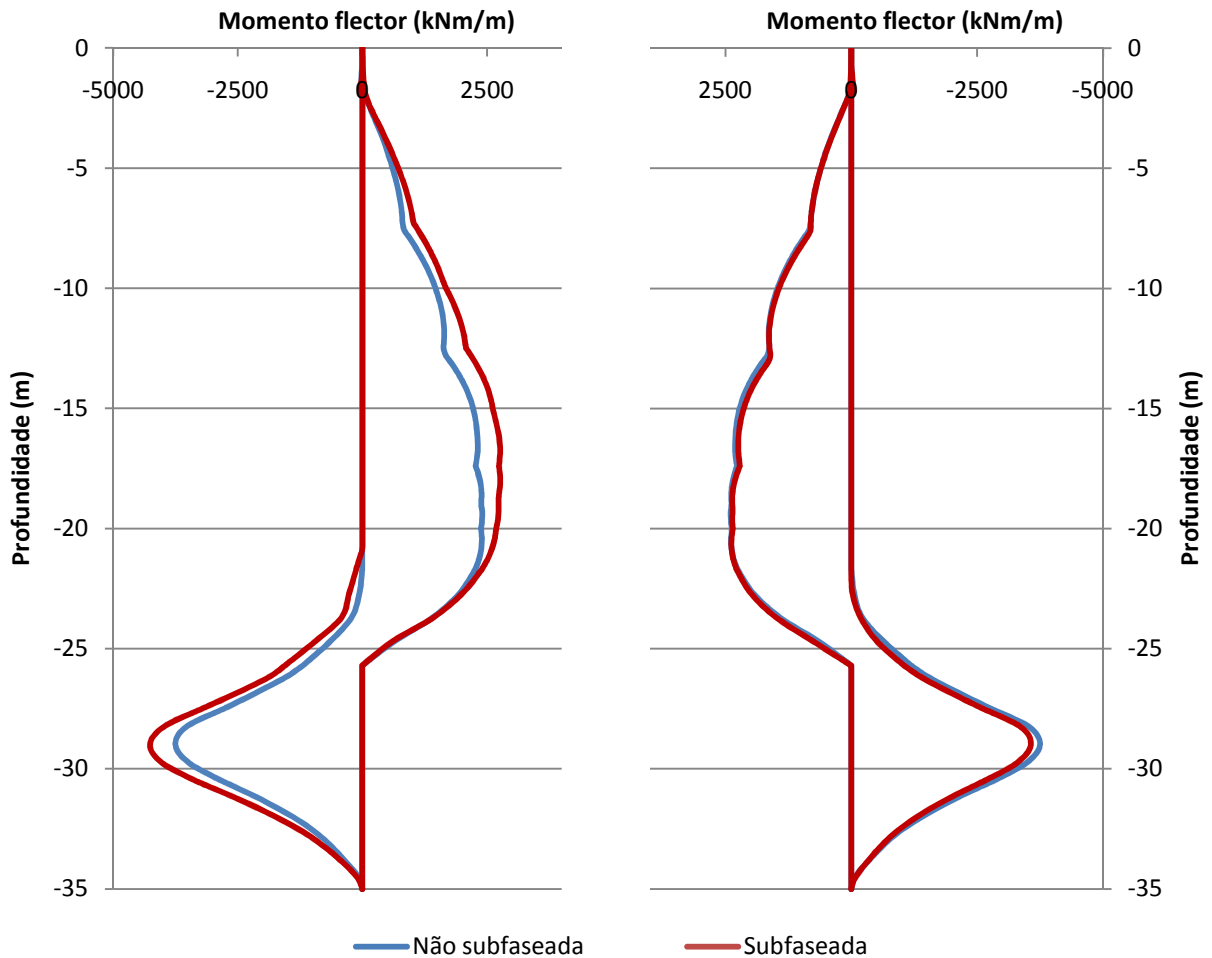


Figura 4.21 – Envolventes dos momentos flectores – 80.HS

Nesta figura é possível ver que devido ao subfaseamento da escavação os momentos flectores na cortina do lado esquerdo são superiores, verificando-se uma muito ligeira redução dos momentos flectores na cortina do lado direito. Os valores máximos dos momentos flectores apresentam-se no Quadro 4.7.

Quadro 4.7 - Valores máximos dos momentos flectores – 80.HS
(valores em kNm/m)

	Lado Esquerdo		Lado Direito	
	M_{\max}^-	M_{\max}^+	M_{\max}^-	M_{\max}^+
Escavação não subfaseada	-3753	2400	-3748	2396
Escavação subfaseada	-4259	2768	-3565	2378

Comparativamente à análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico, os momentos do lado esquerdo são maiores uma vez que a rigidez do solo em descarga é maior e, por isso, quando é escavado o lado direito os momentos do lado esquerdo não são reduzidos. Por outro lado, o facto de a rigidez de recarga ser superior, faz com que os momentos do lado direito não aumentem tanto como aconteceria com a rigidez de primeira-carga quando o mesmo lado é escavado, porque anteriormente

tinha havido uma descarga devido à escavação do lado esquerdo, como é visível nas trajetórias de tensões apresentadas nas Figuras 4.9 a 4.12.

4.4. ANÁLISE DE RESULTADOS – TODAS AS LARGURAS DE ESCAVAÇÃO

4.4.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Tal como para a análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico, para além da escavação do subcapítulo anterior, foram também modeladas escavações com larguras de 20 m, 30 m, 45 m, 55 m, 60 m, 70 m e 100 m. Com isto, pode avaliar-se a influência da largura no subfaseamento da escavação utilizando o modelo *hardening soil*.

4.4.2. MOVIMENTOS ASSOCIADOS

Os deslocamentos horizontais máximos da cortina do lado direito para todas as larguras modeladas encontram-se no Quadro 4.8.

Quadro 4.8 – Resumo dos deslocamentos horizontais da cortina – HS
(valores em mm)

Largura	20 m	30 m	45 m	55 m	60 m	70 m	80 m	100 m
Não subfaseada	68,0	80,1	94,4	102,8	106,6	113,7	119,8	131,2
Subfaseada	65,0	75,4	87,9	94,9	98,0	103,9	109,4	119,4

Para uma melhor análise da influência da largura, relacionou-se os deslocamentos da escavação não subfaseada e da escavação subfaseada. Na Figura 4.22 está representado o quociente entre os deslocamentos máximos da cortina para a escavação não subfaseada e para escavação subfaseada em função da largura de escavação.

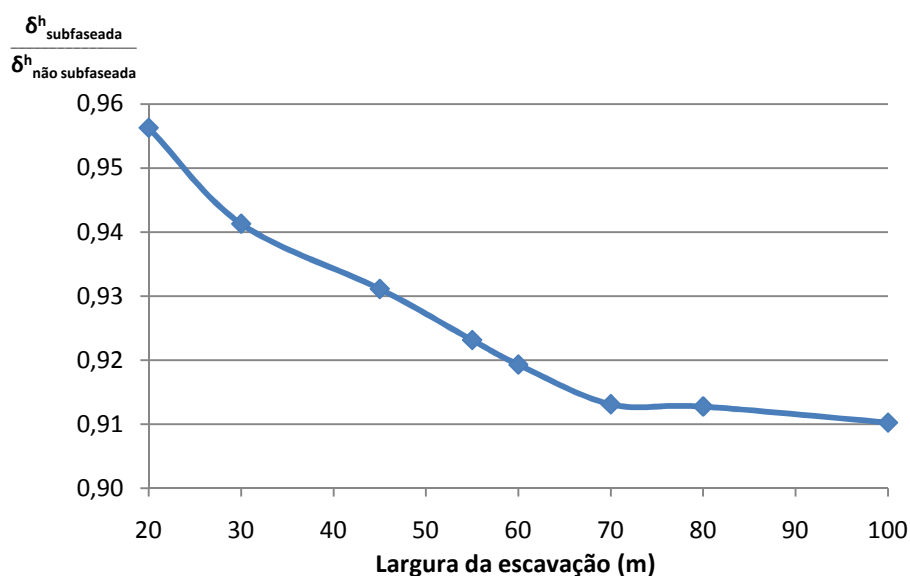


Figura 4.22 – Variação da redução do deslocamento em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – HS

A análise com o modelo *hardening soil* confirma os resultados obtidos na análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico ao verificar-se também aqui que a melhoria em relação aos deslocamentos tem um limite. Neste caso verifica-se que o limite é de aproximadamente 10% de redução dos deslocamentos, enquanto na análise linear era 5%.

O Quadro 4.9 resume os valores obtidos para os assentamentos máximos da superfície do lado direito da escavação.

Quadro 4.9 – Resumo dos assentamentos da superfície – HS
(valores em mm)

Largura	20 m	30 m	45 m	55 m	60 m	70 m	80 m	100 m
Não subfaseada	46,9	55,9	66,7	73,0	76,1	81,0	85,8	94,2
Subfaseada	43,9	51,8	61,2	66,0	68,5	73,0	77,1	84,8

A influência da largura da escavação na redução do assentamento da superfície está representada na Figura 4.23.

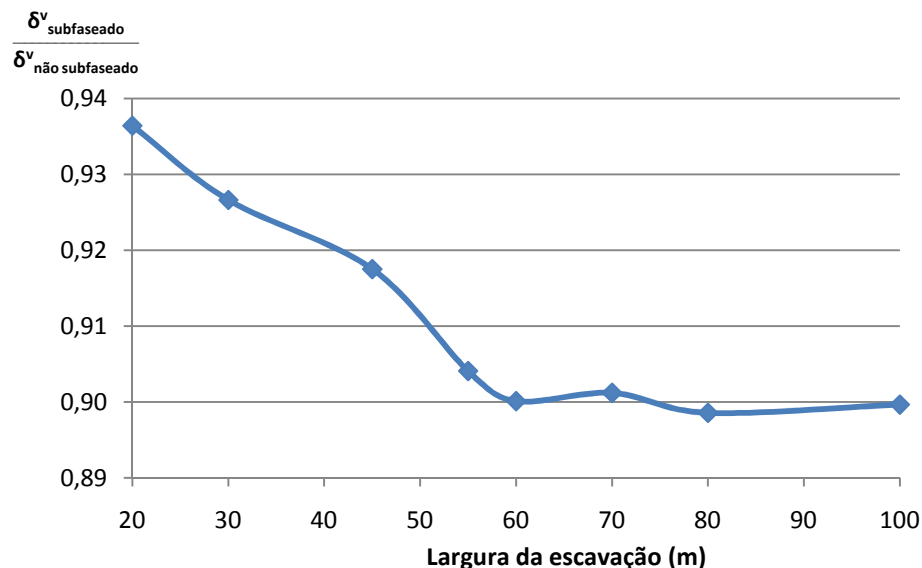


Figura 4.23 – Variação da redução do assentamento da superfície em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação - HS

Como foi visto na análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico, a redução do assentamento era previsível. É possível verificar que para larguras pequenas como 20 m o subfaseamento oferece uma melhoria de 6%, enquanto, para larguras superiores, como 100 m, a redução dos assentamentos chega aos 10%.

4.4.3. ESFORÇOS ESTRUTURAIS

Os esforços axiais máximos nas escoras que apoiam a cortina, para análise com o modelo *hardening soil*, estão apresentados no Quadro 4.10 para a escavação não subfaseada e no Quadro 4.11 para a escavação subfaseada. A variação do esforço axial ao longo do processo construtivo é muito

semelhante ao apresentado no subcapítulo 3.3.3 para a largura de 80 m, e por isso apenas se apresentam os valores máximos.

Quadro 4.10 – Esforços máximos nas escoras – 80.HS.NF
(valores em kN/m)

Largura	20 m	30 m	45 m	55 m	60 m	70 m	80 m	100 m
Escora 1	-304,9	-300,3	-303,3	-308,9	-314,0	-322,8	-330,7	-341,9
Escora 2	-790,8	-757,6	-715,2	-694,3	-686,3	-669,9	-654,1	-633,5
Escora 3	-800,4	-748,3	-699,7	-676,4	-666,2	-638,8	-628,5	-602,4
Escora 4	-640,8	-596,4	-547,5	-526,4	-522,4	-509,0	-485,9	-445,6
Escora 5	-279,6	-236,5	-206,5	-195,3	-190,0	-178,6	-170,5	-151,5

Quadro 4.11 – Esforços máximos nas escoras – 80.HS.SF
(valores em kN/m)

[kN/m]	20 m	30 m	45 m	55 m	60 m	70 m	80 m	100 m
Escora 1	-312,2	-313,9	-319,6	-326,2	-329,1	-336,8	-344,3	-355,3
Escora 2	-825,1	-793,5	-751,7	-728,5	-718,6	-703,3	-689,1	-664,3
Escora 3	-828,0	-774,8	-727,0	-699,0	-690,8	-670,1	-651,5	-619,5
Escora 4	-625,6	-589,0	-540,4	-520,1	-504,8	-494,5	-477,1	-449,5
Escora 5	-272,5	-239,9	-206,3	-190,8	-185,9	-178,9	-166,3	-151,2

Na Figura 4.24 está representada a influência que a largura de escavação na variação do esforço axial nas escoras.

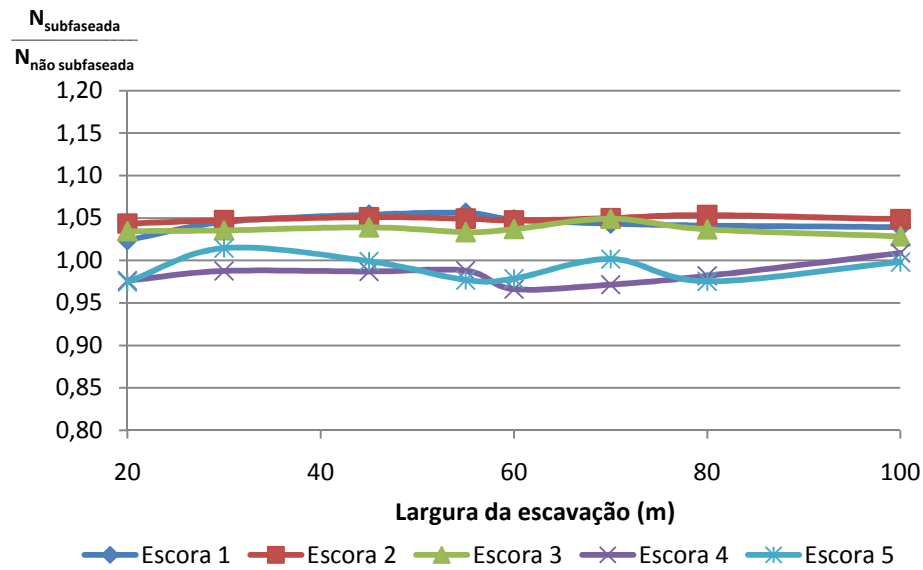


Figura 4.24 – Variação do esforço axial das escoras em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – HS

Verifica-se que a diferença entre os esforços axiais das escoras na escavação subfaseada e a escavação não subfaseada é mínima. Os três primeiros níveis de escoras da escavação subfaseada têm um esforço superior aos escoramentos da escavação não subfaseada, enquanto o quarto e quinto nível têm esforços inferiores.

Os momentos flectores máximos nas cortinas estão apresentados no Quadro 4.12.

Quadro 4.12 – Valores máximos dos momentos flectores da cortina do lado esquerdo – HS
(valores em kNm/m)

Largura		20 m	30 m	45 m	55 m	60 m	70 m	80 m	100 m
Lado Esquerdo	Não subfaseada	-2630	-2911	-3226	-3406	-3488	-3635	-3753	-3968
	Subfaseada	-2977	-3362	-3717	-3897	-3947	-4120	-4259	-4472
Lado Direito	Não subfaseada	2631	2910	3228	3409	3483	3633	3748	3963
	Subfaseada	2551	2805	3092	3247	3324	3440	3565	3782

Também na análise com o modelo *hardening soil*, para a escavação não subfaseada, os valores dos momentos são iguais em ambos os lados, sendo que as pequenas diferenças verificadas se devem à imprecisão do cálculo. No entanto, é possível observar que existem diferenças significativas entre os momentos flectores no lado esquerdo e direito para a escavação subfaseada.

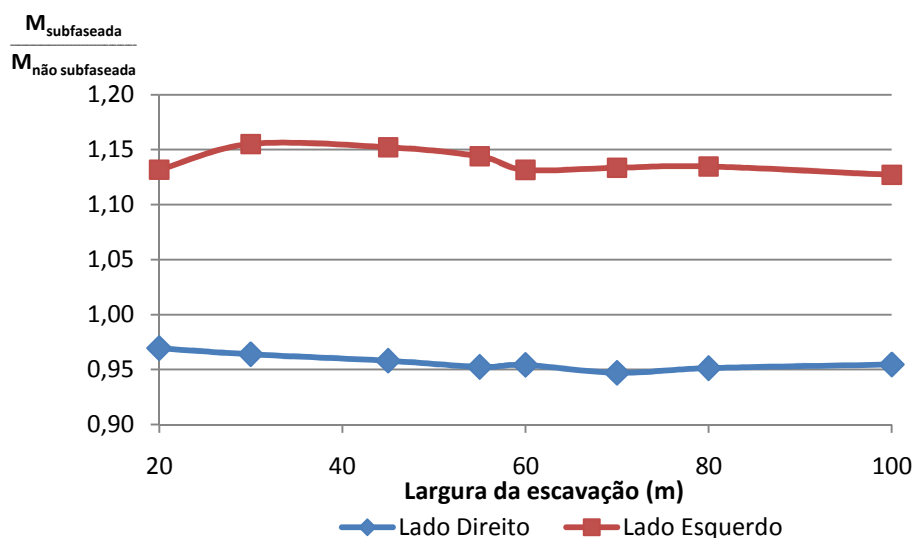


Figura 4.25 – Variação dos momentos flectores das cortinas em relação à escavação não subfaseada com a largura de escavação – HS

Como se pode observar na Figura 4.25, do lado direito os momentos são menores na escavação subfaseada comparativamente à escavação não subfaseada, com uma melhoria de aproximadamente 5%. Pelo contrário, do lado esquerdo há um aumento dos momentos flectores entre 13% a 15% relativamente à escavação não subfaseada.

4.5. ANÁLISE DE RESULTADOS – CÁLCULOS COMPLEMENTARES

4.5.1. CÁLCULOS COM O SOLO MAIS RÍGIDO ($E_u = 800.c_u$)

Para analisar a influência da rigidez no solo no faseamento da escavação, foi modelada a mesma escavação em que os aluviões de argila têm uma rigidez de primeira-carga de $800c_u$, mantendo a relação de $3.E_{50}$ para a rigidez E_{ur} .

Assim, apresentam-se no Quadro 4.13 os valores dos parâmetros utilizados neste modelo.

Quadro 4.13 – Parâmetros de entrada no modelo hardening soil com $800c_u$ - HS

Solo	Profundidade (m)	E_{50} (MPa)	E_{oed} (MPa)	E_{ur} (MPa)	m	c_u (kPa)	φ	ψ	R_f
Aluviões argilosas	0-5	29,6	506,6	88,8	0	37	0	0	0,9
	5-10	29,6	506,6	88,8	0	37	0	0	0,9
	10-15	36,0	616,1	108,0	0	45	0	0	0,68
	15-20	43,2	739,3	129,6	0	54	0	0	0,7
	20-27,5	49,6	848,9	148,8	0	62	0	0	0,75
Substrato miocénico	27,5-33,5	150,0	2567,1	450,0	0	300	0	0	0,9
	33,5-50	500,0	8557,0	1500,0	0	400	0	0	0,9

Também para este caso foram modelados ensaios triaxiais, mas apenas de compressão 1, para verificar o comportamento do solo com estes parâmetros.

Destes ensaios resultaram curvas de tensão de desvio versus extensão axial da qual a Figura 4.26 é exemplo.

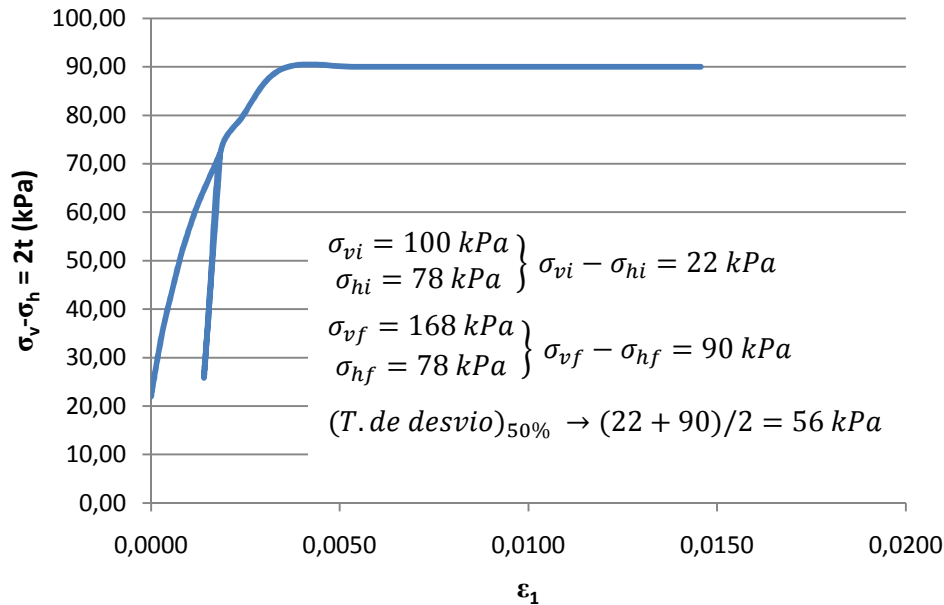


Figura 4.26 – Resultado do ensaio triaxial de compressão 1 do estrato 3 (800c_u) - HS

Analisando todas as curvas obtidas, resultaram os valores do Quadro 4.14 para os parâmetros do modelo *hardening soil*.

Quadro 4.14 – Resultados da modelação dos ensaios triaxiais de compressão 1 (800c_u) - HS

Solo	Profundidade (m)	E ₅₀ (MPa)	E ₅₀ /c _u	E _{ur} (MPa)	E _{ur} /E ₅₀	c _u (kPa)
Aluviões argilosas	0-5	28,8	778,4	88,8	3,1	37
	5-10	28,8	778,4	88,8	3,1	37
	10-15	34,5	766,7	108,0	3,1	45
	15-20	42,7	790,7	129,6	3,0	54
	20-27,5	47,5	766,1	148,8	3,1	62
Substrato miocénico	27,5-33,5	154,0	513,3	450,0	2,9	300
	33,5-50	502,3	1255,8	1500,0	3,0	400

Tal como para a modelação com 400c_u, os valores obtidos não diferem mais de 5% do pretendido e por isso foram utilizados na modelação da escavação.

O comportamento do solo com esta rigidez, em termos qualitativos, é semelhante ao comportamento que este tem com uma rigidez de 400c_u. Por isso, apenas se mostram no Quadro 4.15 os valores máximos obtidos na modelação com o modelo *hardening soil* para uma rigidez de 800c_u.

Quadro 4.15 – Resumo dos resultados da escavação não faseada com rigidez $800c_u - 80.HS$

		Não subfaseada	Subfaseada	Diferença
Deslocamento máximo da cortina (mm)	Esquerda	105	119	13%
	Direita	105	85	-19%
Assentamento máximo da superfície (mm)	Esquerda	76	90	18%
	Direita	76	61	-20%
Momento flector máximo da cortina (kNm/m)	Esquerda	-3420	-3713	9%
	Direita	3452	2973	-14%
Esforço axial máximo (kN/m)	Escora 1	-344	-338	-2%
	Escora 2	-683	-694	2%
	Escora 3	-690	-699	1%
	Escora 4	-347	-483	40%
	Escora 5	-163	-160	2%

Comparando ambas as escavações é possível verificar que com maior rigidez do solo o subfaseamento da escavação reduz ainda mais os deslocamentos da cortina do lado direito, assim como os assentamentos da superfície.

Foi visto que o que influencia significativamente os deslocamentos e os momentos flectores da cortina é a rigidez de descarga-recarga quando se efectua o subfaseamento da escavação. Nestes dois últimos cálculos a diferença entre a escavação não subfaseada e a escavação subfaseada é maior simplesmente porque para além de se duplicar a rigidez de primeira carga também se duplica a rigidez de descarga-recarga, logo o efeito do subfaseamento é ainda mais notório. Ou seja, quanto maior for a rigidez do solo, maiores serão os ganhos relativamente ao subfaseamento da escavação.

4.5.2. CÁLCULOS COM ESCORAS COM PRÉ-ESFORÇO CONVENCIONAL

Foi também analisado o efeito de pré-esforçar as escoras com o subfaseamento da escavação juntamente com o pré-esforço convencional. Tal como na análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico, este estudo foi efectuado para a rigidez de $400c_u$ com um pré-esforço de 200 kN para o primeiro nível de escoras e 400 kN nos restantes.

Assim, obtiveram-se os resultados do Quadro 4.16.

Quadro 4.16 – Resumo dos resultados da escavação com pré-esforço convencional nas escoras – 80.HS

		Não subfaseada	Subbaseada	Diferença
Deslocamento máximo da cortina (mm)	Esquerda	74	83	9%
	Direita	74	72	-3%
Assentamento máximo da superfície (mm)	Esquerda	52	57	10%
	Direita	52	50	-4%
Momento flector máximo da cortina (kNm/m)	Esquerda	-2563	-2777	8%
	Direita	2566	2517	-2%
Esforço axial máximo (kN/m)	Escora 1	-344	-349	1%
	Escora 2	-684	-699	2%
	Escora 3	-669	-683	2%
	Escora 4	-568	-566	0,4%
	Escora 5	-496	-496	0%

Também na escavação com o modelo *hardening soil*, o subfaseamento da escavação em conjunto com o pré-esforço convencional resulta em diferenças mínimas de redução de deslocamentos.

4.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No capítulo anterior foi visto que o subfaseamento da escavação actua favoravelmente na redução dos deslocamentos de uma das cortinas de contenção. No entanto, essa análise foi efectuada com um modelo elástico-perfeitamente plástico, que simula o comportamento do solo de uma forma muito simples.

Neste capítulo, foi utilizado um modelo constitutivo em que a rigidez do solo é dependente da trajectória de tensões, o modelo *hardening soil*, que é capaz de prever o comportamento do solo com mais rigor que o modelo elástico-perfeitamente plástico, e por isso os resultados obtidos serão mais próximos do comportamento real do solo.

Numa escavação suportada por escoras, quando se pré-esforça, a tensão de desvio do solo suportado é reduzida e, por isso, nas fases seguintes de escavação vai haver um maior número de elementos do solo suportado em descarga-recarga. Isto explica por que é que quando se passa de um modelo elástico-perfeitamente plástico para um modelo com endurecimento em que a rigidez de descarga-recarga é superior à rigidez de primeira-carga, como o modelo *hardening soil*, o subfaseamento da escavação, que consiste na aplicação de pré-esforço, se torna mais importante. Assim, os resultados obtidos com o modelo *hardening soil* mostram que a redução dos deslocamentos de uma das cortinas de contenção é ainda maior do que na análise com o modelo elástico-perfeitamente plástico, assim como os assentamentos da superfície.

Verifica-se também neste modelo que em solos com maior rigidez o subfaseamento da escavação apresenta melhores resultados, e que o pré-esforço convencional minimiza o efeito do subfaseamento da escavação.

5

ANÁLISES COM ESCORAS COM A RIGIDEZ AXIAL DEPENDENTE DO ESFORÇO AXIAL

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para a análise de problemas geotécnicos é possível utilizar vários modelos de cálculo ou leis constitutivas de forma a simular o solo. Como foi visto nos capítulos anteriores, foi usado um modelo linear elástico-perfeitamente plástico e um modelo não linear, *hardening soil*.

Nos capítulos 3 e 4 deste trabalho as escoras foram modeladas com comportamento linear, ou seja, a rigidez axial da escora é constante ao longo de toda a escavação. Mas, como foi visto no capítulo 2, a rigidez efectiva de uma escora não é linear. A rigidez efectiva de uma escora depende do esforço axial a que esta está sujeita, como mostra a Figura 5.1a. No entanto, as modelações de escavações da bibliografia consultada consideram as escoras com rigidez constante ao longo da escavação.

Neste capítulo, as escavações serão novamente modeladas considerando o solo com rigidez dependente da trajectória de tensões, utilizando o modelo *hardening soil* já apresentado, e as escoras com um comportamento semelhante ao representado na Figura 5.1b de modo a assim estudar melhor o efeito do subfaseamento da escavação.

Como foi visto no capítulo 2, o pré-esforço do escoramento permite que este se comporte, no início da escavação, com uma rigidez efectiva superior à das escoras em que o pré-esforço não é aplicado. Compreende-se então que, considerando a não linearidade do escoramento, o subfaseamento da escavação tenha maior importância pelo simples facto de que, quando se escava do lado que se pretende minimizar os deslocamentos, a escora apresenta uma rigidez superior comparativamente à escavação não subfaseada.

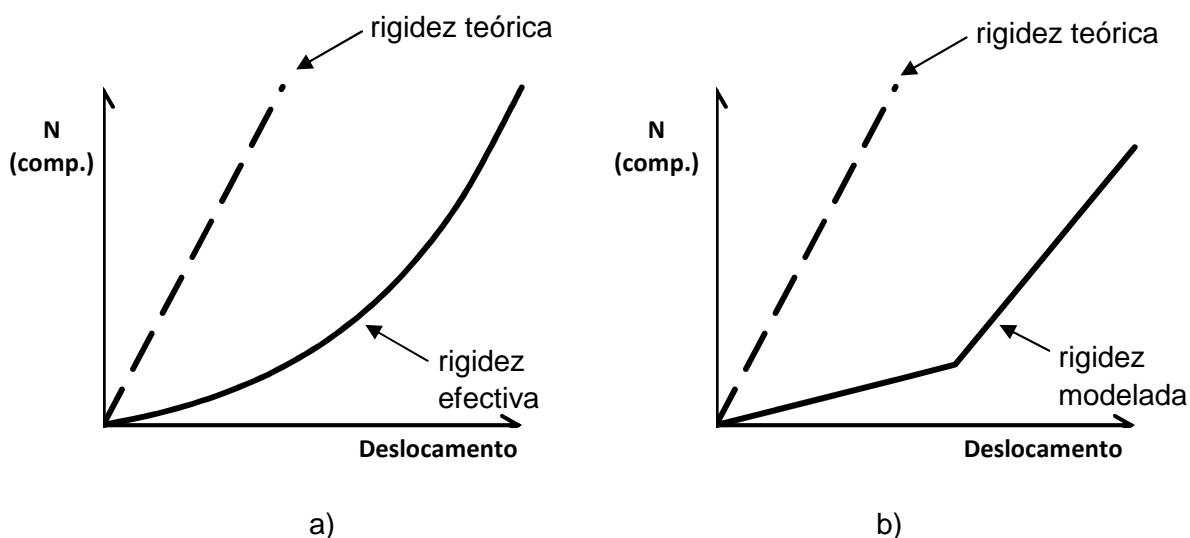


Figura 5.1 – Diagrama carga-deslocamento de uma escora – a) real; b) modelado

5.2. CÁLCULOS EFECTUADOS

Para aplicar um comportamento à escora semelhante ao da Figura 5.1b, considerou-se que a escora tem menor rigidez na primeira subfase de escavação imediatamente após a sua instalação e daí para diante tem maior rigidez até à conclusão da escavação. Ou seja, na subfase em que é retirado o solo do lado esquerdo, a rigidez da escora recém-colocada é menor; na subfase seguinte, que corresponde à escavação do lado direito desse nível, e nas restantes fases de escavação a rigidez axial da escora é maior.

Uma vez que nos cálculos anteriores a rigidez axial das escoras foi considerada 30% da rigidez teórica, nos dois primeiros grupos de cálculos a rigidez média das escoras também será 30% da rigidez teórica de forma a estes serem passíveis de comparação, apesar de parcial, com os anteriores. Será ainda feito mais um grupo de cálculos em que a rigidez média da escora será de 50% da rigidez teórica.

Assim, num primeiro grupo de cálculos, admitir-se-á que a rigidez inicial da escora é metade da rigidez final, ou seja, a rigidez inicial é 20% da rigidez teórica e a rigidez final é 40% da rigidez teórica. No segundo grupo de cálculos, a rigidez inicial é um quarto da rigidez final, resultando 12% da rigidez teórica para a rigidez inicial e 48% para a rigidez final. Por fim, no terceiro grupo, a rigidez inicial é um quarto da rigidez final, isto é, 20% para a rigidez inicial e 80% para a rigidez final, por forma à rigidez média ser 50% da rigidez teórica.

As escavações com este modelo são identificadas com as siglas ENL20/40, ENL12/48 e ENL20/80, para os cálculos 1, 2 e 3 respectivamente.

No Quadro 5.1 apresentam-se os valores da rigidez axial das escoras utilizadas nas escavações analisadas neste capítulo.

Quadro 5.1 – Escoras não lineares – Rigidez axial das escoras

Nível	ENL20/40		ENL12/48		ENL20/80	
	EA (20%) (MN)	EA (40%) (MN)	EA (12%) (MN)	EA (48%) (MN)	EA (20%) (MN)	EA (80%) (MN)
1	1067,7	2119,5	637,4	2549,8	1067,7	4249,6
2	1404,6	2788,2	838,6	3354,2	1404,6	5590,4
3	1537,2	3051,6	917,8	3671,0	1537,2	6118,4
4	2166,4	4300,4	1293,4	5173,4	2166,4	8622,4
5	1404,6	2788,2	838,6	3354,2	1404,6	5590,4

Os cálculos foram efectuados apenas para a escavação subfaseada com largura de 80 m, que pelas análises dos capítulos anteriores mostrou resultados que correspondem ao efeito máximo que o subfaseamento da escavação pode provocar.

Uma vez que, devido à simplificação do método para simular as escoras com comportamento não linear, não foi possível modelar escavações não subfaseadas com o mesmo modelo constitutivo para as escoras, apenas se procedeu à modelação de escavações subfaseadas. Os resultados destas serão parcialmente comparados com as várias escavações do capítulo anterior.

5.3. ANÁLISE DE RESULTADOS – ENL20/40

5.3.1. MOVIMENTOS ASSOCIADOS

No Quadro 5.2 recordam-se os valores obtidos nas escavações analisadas no capítulo 4 para a largura de 80 m, com escoras com comportamento linear e rigidez 30% da teórica.

Quadro 5.2 – Resumo dos movimentos associados às escavações do capítulo 4

		Deslocamento máximo da cortina (mm)	Assentamento da superfície (mm)
Escavação não subfaseada		120	86
Escavação subfaseada	Lado esquerdo	144	105
	Lado direito	109	77

Analisando agora a estrutura com escoras com uma diferença entre a rigidez inicial e final menor, que para este grupo de cálculos se considerou 20% e 40%, respectivamente, obteve-se os deslocamentos horizontais da cortina da escavação subfaseada apresentados na Figura 5.2.

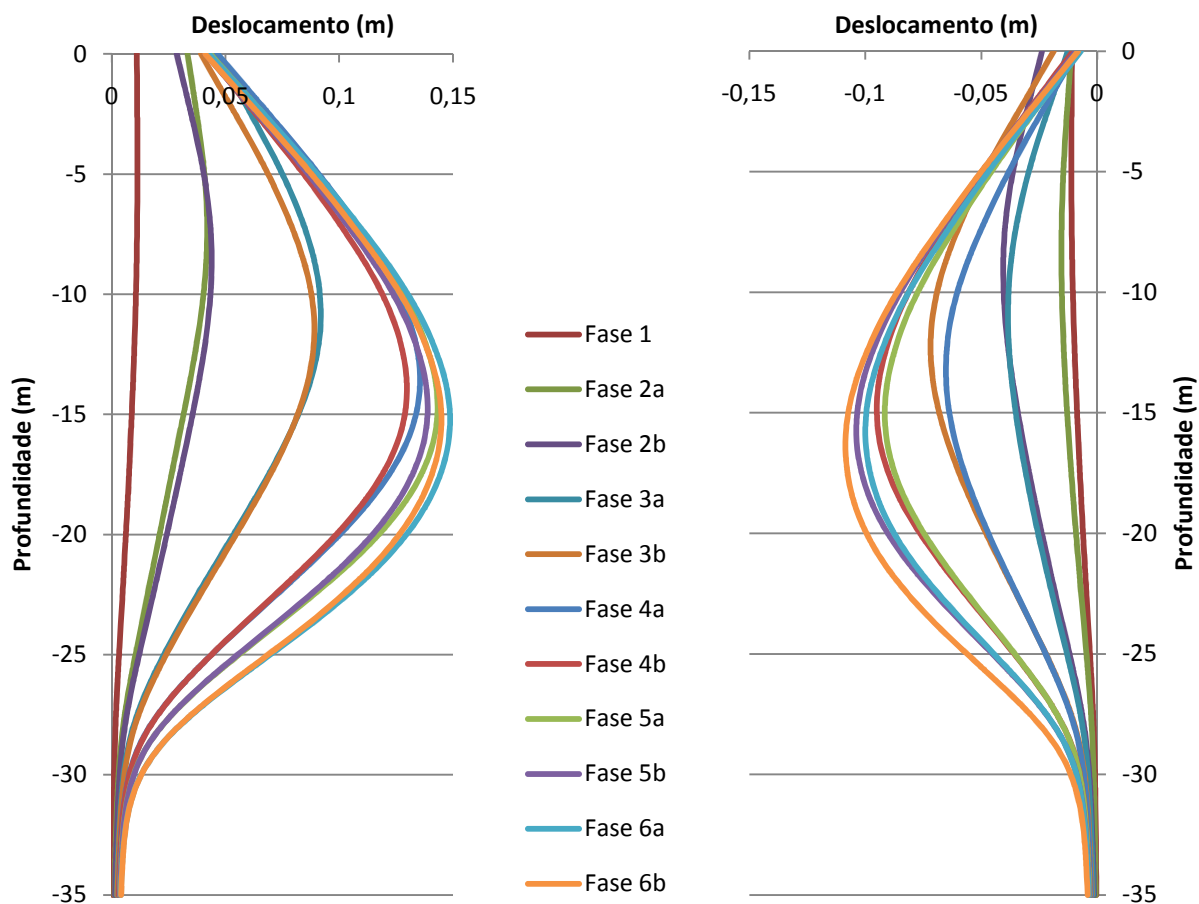


Figura 5.2 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.ENL20/40

O deslocamento máximo no topo da cortina do lado esquerdo é 47 mm e 24 mm do lado direito. Do lado esquerdo resultou um deslocamento máximo da cortina de 149 mm e do lado direito um deslocamento de 109 mm. Os valores de assentamento máximo são, para o lado esquerdo e direito, respectivamente, de 110 mm e 77 mm.

Na Figura 5.3 comparam-se os deslocamentos finais da cortina deste ultimo cálculo e das duas análises subfaseada e não subfaseada apresentadas no capítulo anterior para as mesmas condições mas com escoras com comportamento linear e rigidez 30% da teórica.

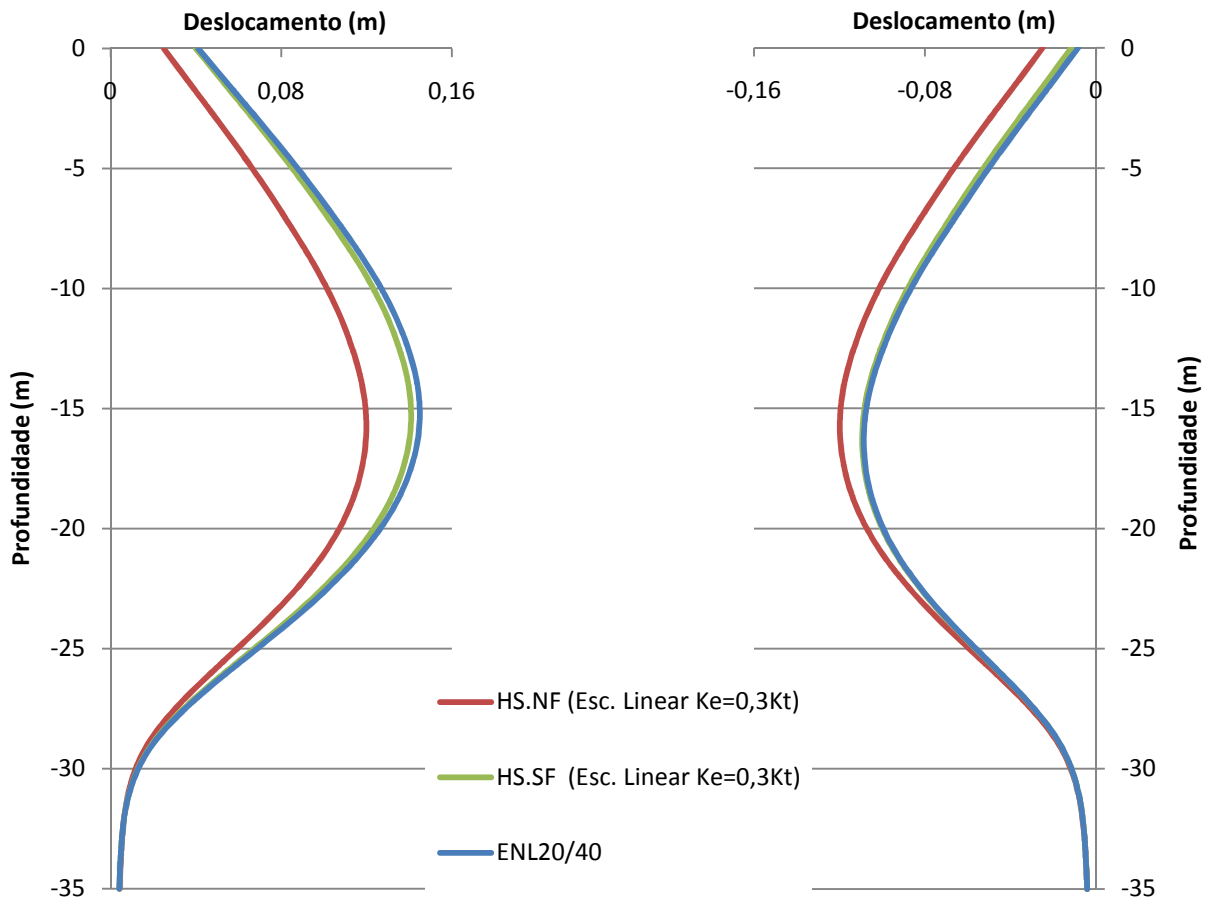


Figura 5.3 – Deslocamentos horizontais finais da cortina – 80.ENL20/40

Analisando a Figura 5.3, verifica-se que, do lado esquerdo, o deslocamento da cortina é maior na escavação com escoras com comportamento não linear. Este facto é explicado por a rigidez das escoras na subfase de escavação imediatamente após a colocação desta é menor, e por isso, é necessário um maior deslocamento para atingir o esforço axial para suportar a cortina.

Do lado direito, o deslocamento final da cortina da escavação com escoras com comportamento não linear é muito próximo do deslocamento da cortina da escavação subfaseada com escoras com comportamento linear. Embora a rigidez das escoras nas subfases em que é retirado o solo do lado direito seja maior do que a rigidez média, o esforço axial na escora recém-colocada é menor comparativamente à escavação em que as escoras têm rigidez igual à média correspondente, como se verá mais à frente.

As diferenças verificadas nos assentamentos da superfície devem-se aos mesmos motivos expostos para os deslocamentos da cortina, uma vez que aqueles estão intrinsecamente relacionados com estes.

5.3.2. ESFORÇOS ESTRUTURAIS

A variação dos esforços axiais nas escoras na escavação em que estas têm um comportamento não linear está apresentada na Figura 5.4.

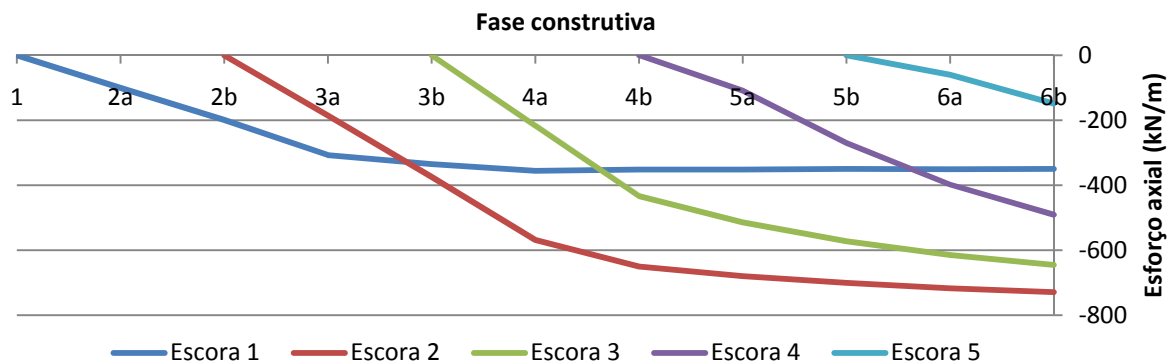


Figura 5.4 – Esforços nas escoras – 80.ENL20/40

Nas curvas das escoras 4 e 5 é de reparar que na primeira subfase construtiva, em que as escoras são colocadas em funcionamento, o aumento do esforço axial nestas é menor do que nas fases seguintes. Tal deve-se ao facto de a rigidez de cada escora ser menor nessa mesma fase comparativamente às fases seguintes.

Os valores máximos são, por ordem crescente de nível de escoramento, -355 kN/m, -729 kN/m, -645 kN/m, -491 kN/m e -149 kN/m.

Para uma melhor análise dos esforços axiais nas escoras, apresentam-se nas Figuras 5.5 a 5.9 a comparação dos esforços axiais nas três escavações em análise para cada nível de escoramento.

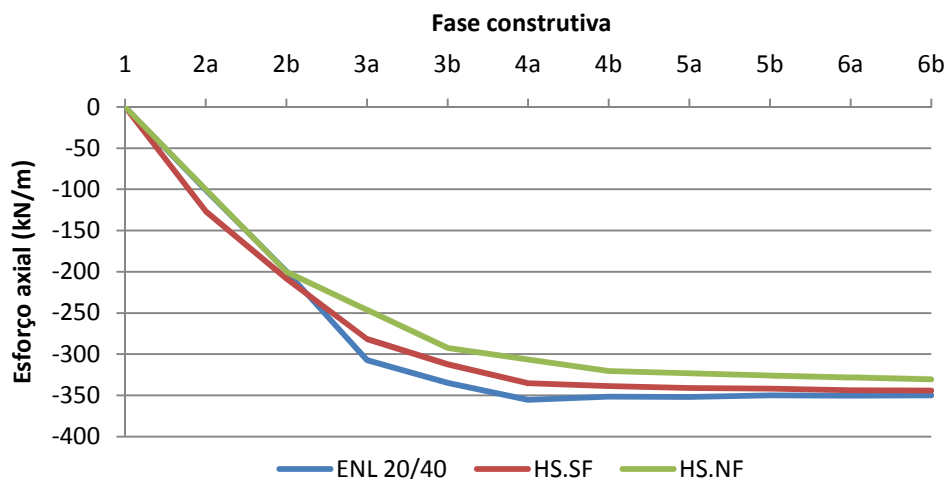


Figura 5.5 – Esforço axial do primeiro nível de escoramento – 80.ENL20/40

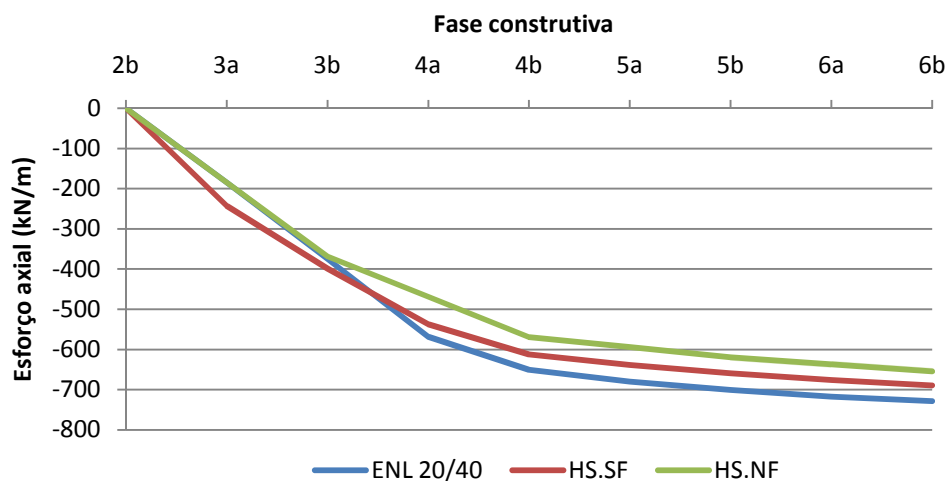


Figura 5.6 – Esforço axial do segundo nível de escoramento – 80.ENL20/40

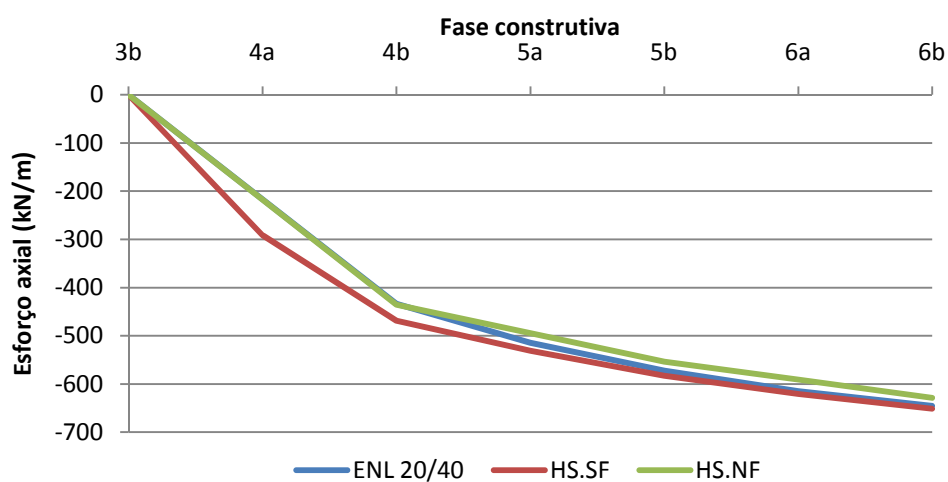


Figura 5.7 – Esforço axial do terceiro nível de escoramento – 80.ENL20/40

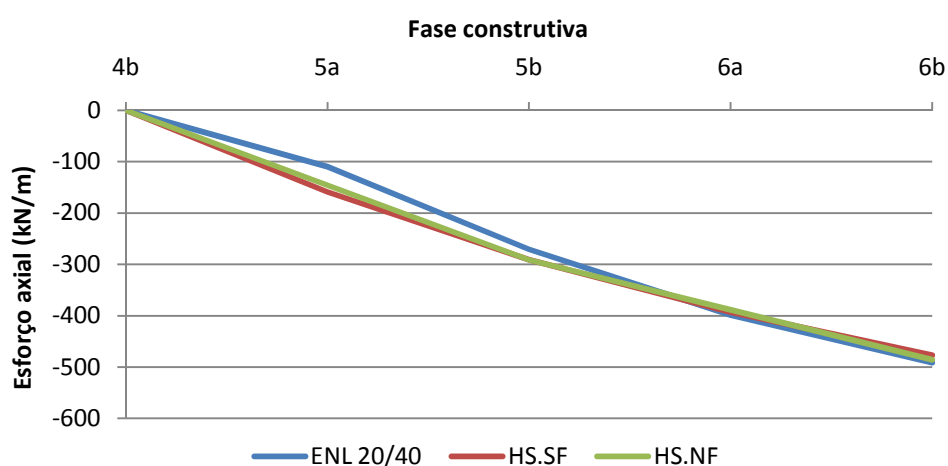


Figura 5.8 – Esforço axial do quarto nível de escoramento – 80.ENL20/40

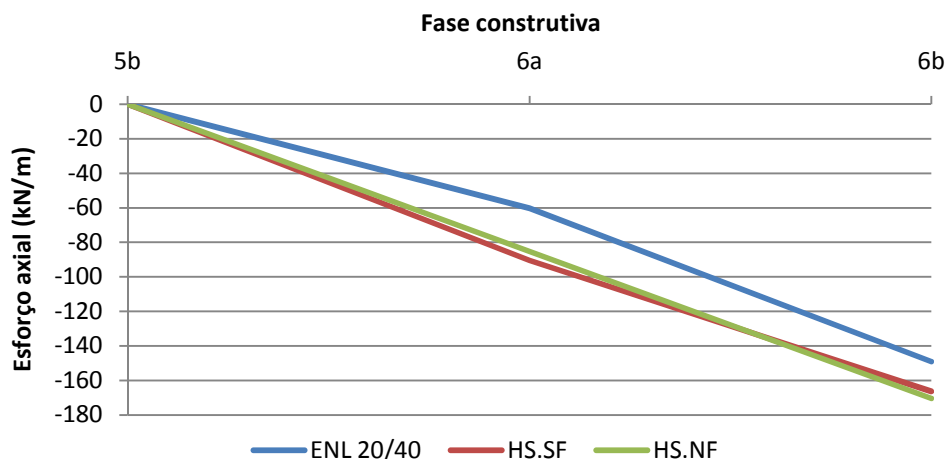


Figura 5.9 – Esforço axial do quinto nível de escoramento – 80.ENL20/40

Comparando as duas escavações subfaseadas é notória a diferença do esforço axial do quarto e quinto nível de escoras na subfase imediatamente após a colocação da escora, verificando-se que o esforço axial nessa subfase é menor na escavação em que a escora tem um comportamento não linear. Então, uma vez que quando se retira o solo do lado direito o esforço axial na escora é menor, pode concluir-se que o pré-esforço da escora pelo subfaseamento da escavação é menor na escavação em que se considera que as escoras têm uma rigidez que depende do esforço axial.

Embora nas duas subfases imediatamente após a colocação da escora o esforço axial seja menor, resultando em maiores deslocamentos da cortina do lado direito, verifica-se que os deslocamentos finais da cortina não diferem significativamente entre as duas escavações subfaseadas. Tal facto é explicado pelo aumento da rigidez nas escoras nas subfases seguintes, de que resulta um menor deslocamento da cortina do lado direito nessas subfases que, por sua vez, resulta em deslocamentos finais muito similares para ambas as escavações.

Como foi visto, os esforços nas escoras não dependem significativamente do subfaseamento da escavação. No entanto, a rigidez das escoras é diferente numa e noutra escavação, o que poderá levar a que os seus esforços sejam diferentes, e por consequência, os deslocamentos também serão diferentes. Para confirmar este facto, apresenta-se nas Figuras 5.10 a 5.14 o esforço axial em função da variação de comprimento que esta sofreu, para cada nível de escoramento, para as escavações subfaseadas, deste e do capítulo 4, e para a escavação não subfaseada daquele.

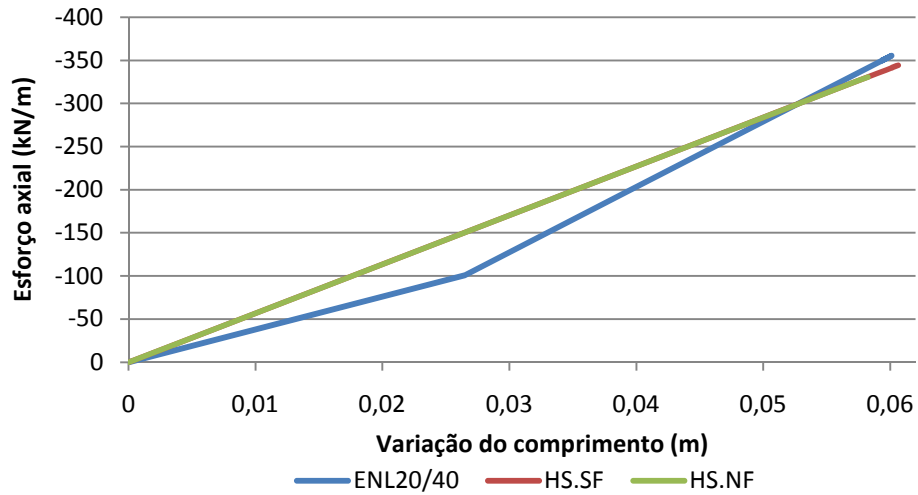


Figura 5.10 – Esforço axial versus variação do comprimento do primeiro nível de escoramento – 80.ENL20/40

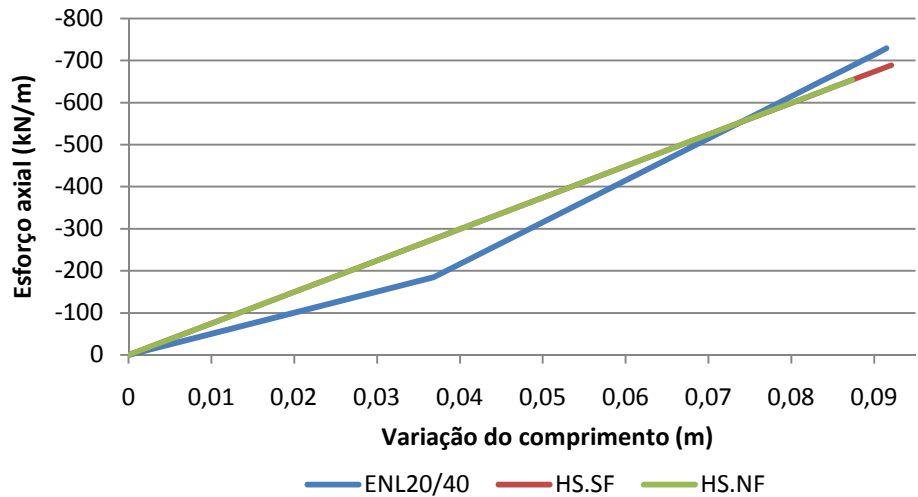


Figura 5.11 – Esforço axial versus variação do comprimento do segundo nível de escoramento – 80.ENL20/40

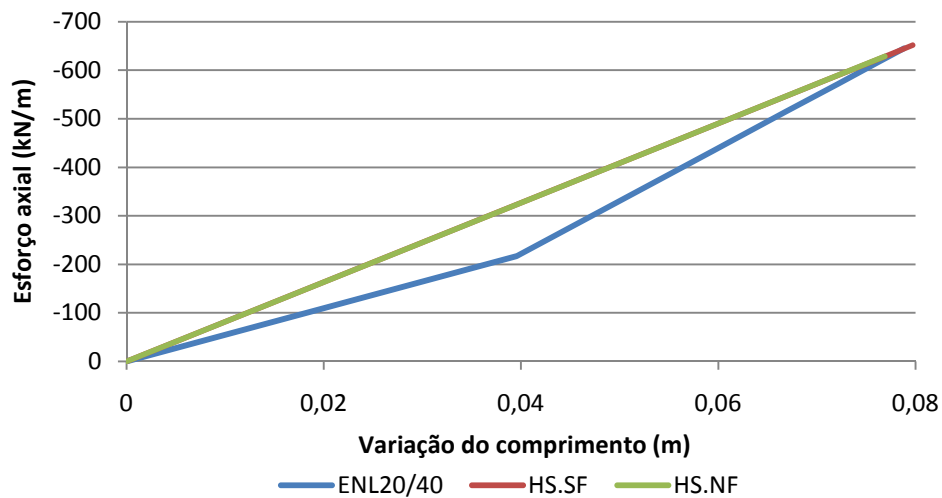


Figura 5.12 – Esforço axial versus variação do comprimento do terceiro nível de escoramento – 80.ENL20/40

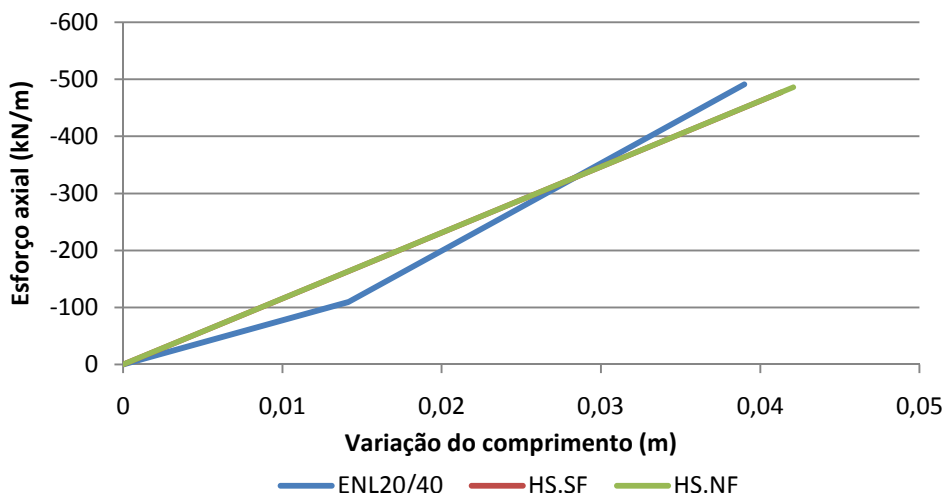


Figura 5.13 – Esforço axial versus variação do comprimento do quarto nível de escoramento – 80.ENL20/40

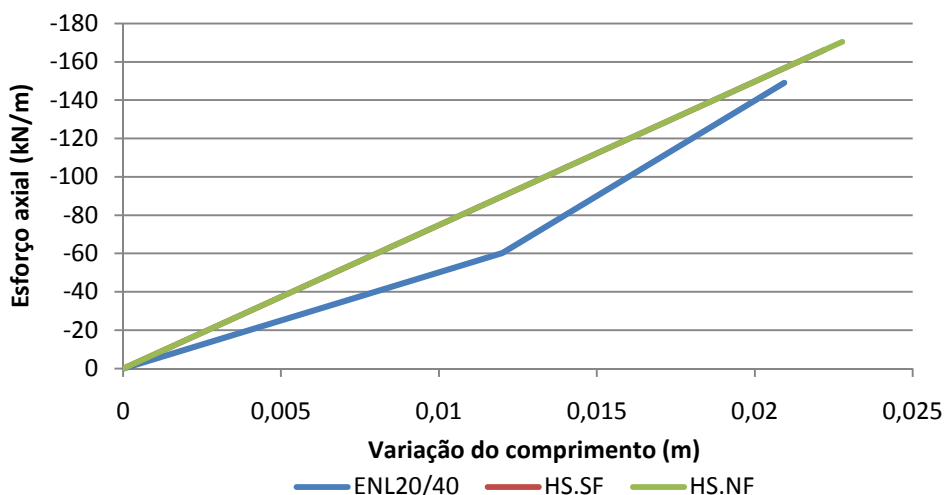


Figura 5.14 – Esforço axial versus variação do comprimento do quinto nível de escoramento – 80.ENL20/40

Analisando estas figuras é possível ver que as curvas das escavações do capítulo anterior estão sobrepostas. Tal deve-se ao facto de as rigidezes das escoras destas escavações serem iguais, isto é, nas análises do capítulo 4 considerou-se que para as escavações não subfaseadas e subfaseadas as escoras tinham rigidez igual a 30% da rigidez teórica.

Observando a curva a azul nestas figuras, é possível verificar que a não linearidade da rigidez das escoras foi conseguida, sendo notória a diferença da rigidez no início e no fim da mesma escavação.

Verifica-se que, no final da escavação, as escoras com comportamento não linear apresentam esforços e deformações próximas das escoras com rigidez constante ao longo de toda a escavação, considerando-se, portanto, que o modelo de rigidez dado às escoras para simular a não linearidade do seu comportamento é válido.

No entanto, os esforços nas escoras das várias escavações são distintos. Este facto explica por que razão a escavação com escoras com comportamento não linear apresenta um ganho em relação à

escavação não subfaseada com escoras com comportamento linear, praticamente igual ao constatado no capítulo 4 para a escavação subfaseada também com comportamento linear das escoras. Ou seja, sendo distintos os valores finais dos esforços no escoramento nas análises ENL20/40 e HS.SF (com escoras lineares e rigidez 30% da teórica) – o que é compreensível tratando-se de um problema não linear altamente complexo – não é legítimo, pelo menos totalmente, comparar os resultados das análises ENL20/40 e HS.NF para avaliar a importância do subfaseamento da escavação quando as escoras têm comportamento não linear.

5.4. ANÁLISE DE RESULTADOS – ENL12/48

5.4.1. MOVIMENTOS ASSOCIADOS

Neste segundo grupo de cálculos considerar-se-á que as escoras, na subfase imediatamente após a sua colocação, têm rigidez igual a 12% da rigidez teórica e que nas subfases seguintes têm rigidez igual a 48% da rigidez teórica.

Os deslocamentos horizontais da cortina resultantes desta escavação, estão representados na Figura 5.15.

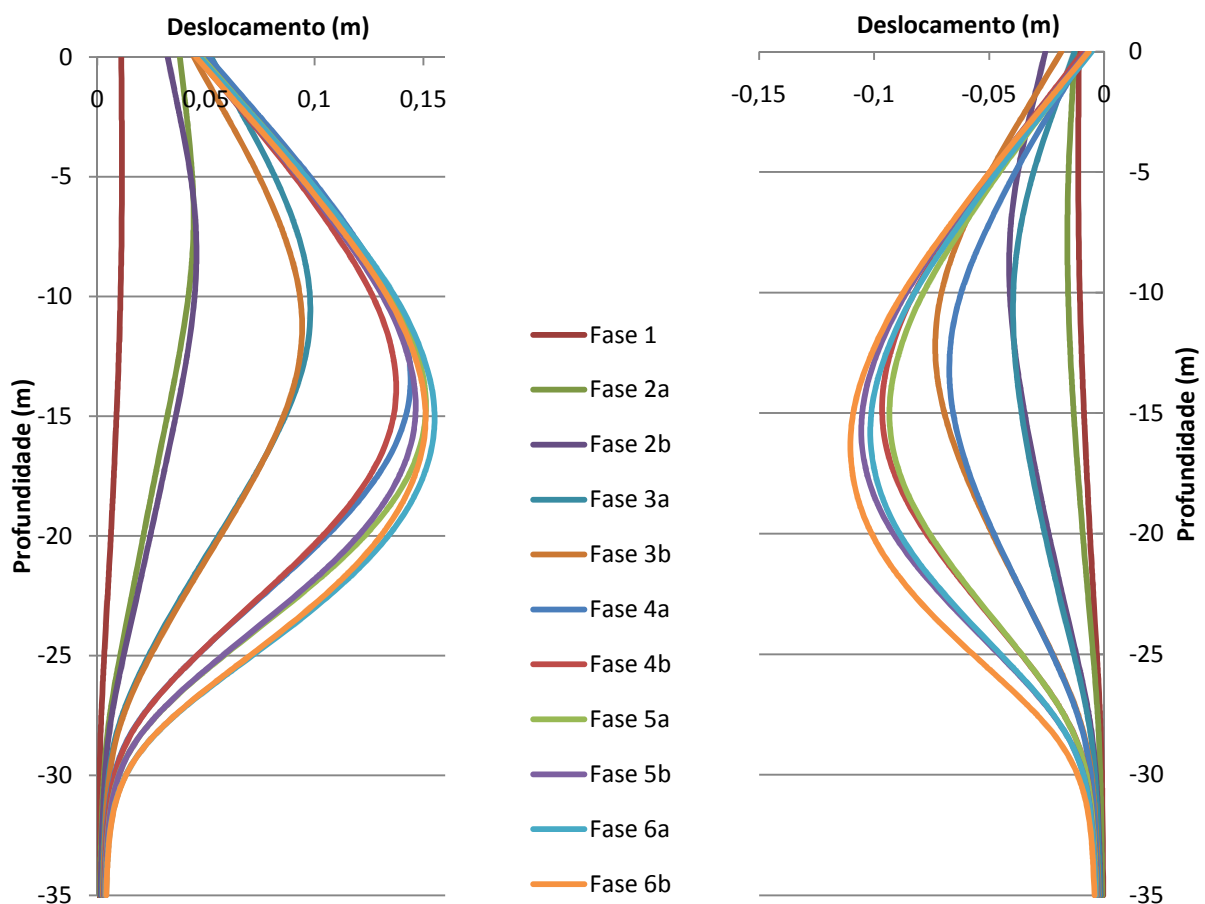


Figura 5.15 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.ENL12/48

O deslocamento máximo no topo da cortina do lado esquerdo é 52 mm e do lado direito é 25 mm. Do lado esquerdo resultou um deslocamento máximo da cortina de 155 mm e do lado direito um deslocamento de 110 mm. Os valores de assentamento máximo são, para o lado esquerdo e direito respectivamente, de 115 mm e 78 mm.

Na Figura 5.16 comparam-se os deslocamentos horizontais finais da cortina deste cálculo e das duas escavações subfaseada e não subfaseada com escoras com rigidez constante ao longo de toda a escavação, apresentadas no capítulo 4.

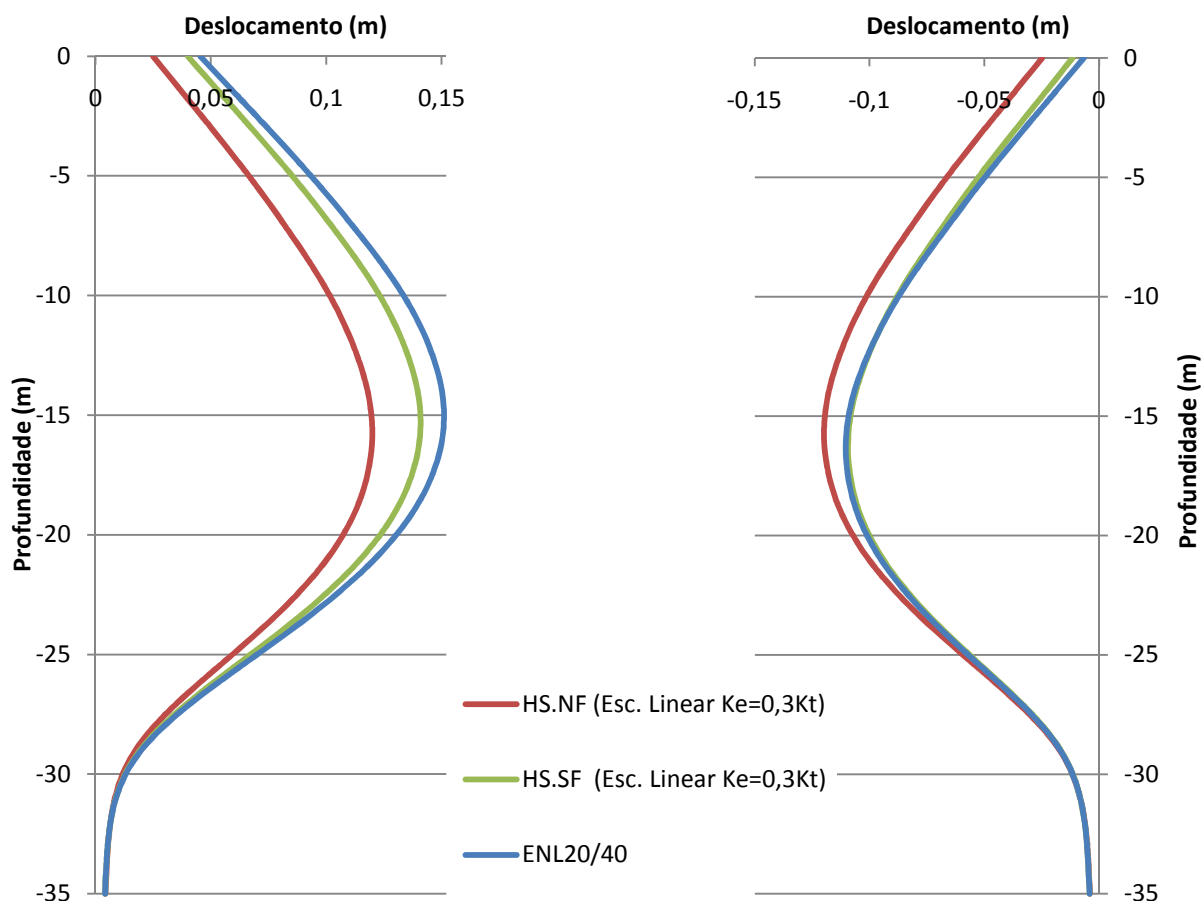


Figura 5.16 – Deslocamentos horizontais finais da cortina – 80.ENL12/48

Analisando os deslocamentos da cortina da escavação na qual as escoras têm rigidez inicial igual a 12% da rigidez teórica é possível verificar que do lado esquerdo os deslocamentos horizontais são maiores. Tal deve-se à rigidez da escora na subfase imediatamente após a sua colocação ser menor do que no cálculo anterior, sendo necessário um maior deslocamento para se atingir um esforço capaz de suportar o maciço.

Como foi explicado na análise do grupo de cálculos anterior, o facto de as escoras terem menor rigidez inicial levam a que o pré-esforço aplicado pelo subfaseamento da escavação seja menor, o que resulta em maiores deslocamentos. Nas subfases seguintes, a rigidez das escoras é maior e daí resultam menores deslocamentos.

5.4.2. ESFORÇOS ESTRUTURAIS

Na Figura 5.17 estão representados os valores do esforço axial nas escoras para a escavação subfaseada com escoras com rigidez não linear.

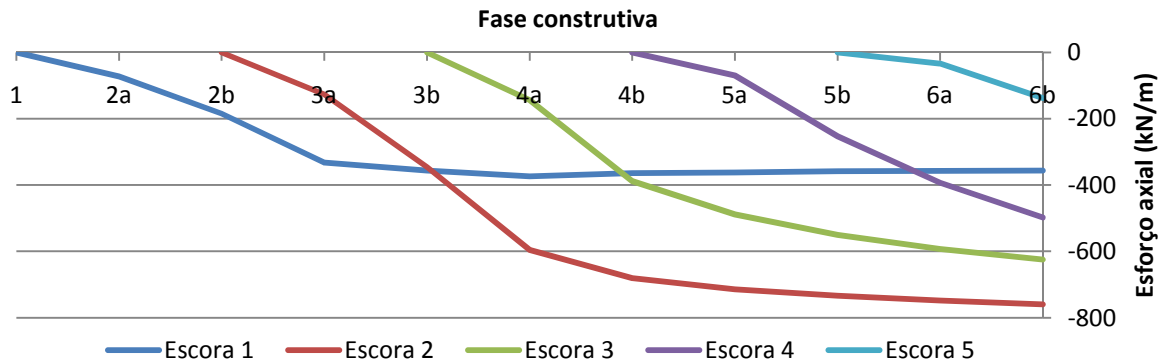


Figura 5.17 – Esforços nas escoras – 80.ENL12/48

Desta análise resultam os valores máximos para os esforços axiais de 374 kN/m, 760 kN/m, 625 kN/m, 498 kN/m e 138 kN/m, para os níveis de escoramento de 1 a 5, respectivamente.

Verifica-se que os esforços nas escoras do primeiro e segundo nível são maiores relativamente às análises anteriores. No quinto nível de escoramento o esforço axial é menor e nos restantes este é praticamente igual ao esforço axial obtido nas análises do capítulo 4. Para melhor realçar este facto, apresenta-se nas Figuras 5.18 a 5.22 a comparação dos esforços axiais dos vários níveis de escoramento da escavação desta análise com as escavações analisadas no capítulo 4.

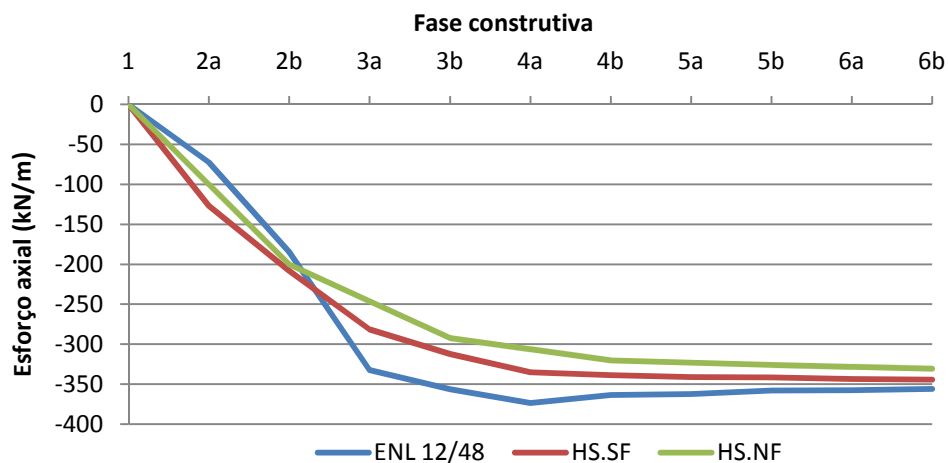


Figura 5.18 – Esforço axial do primeiro nível de escoramento – 80.ENL12/48

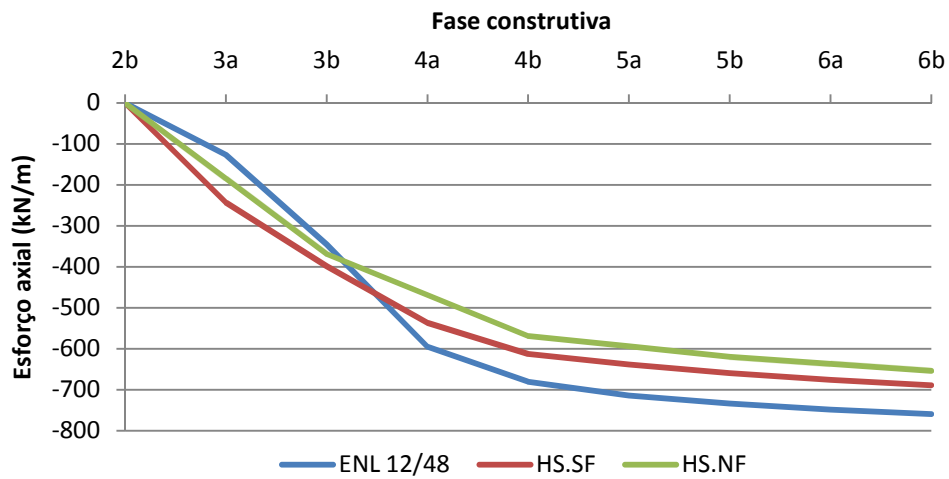


Figura 5.19 – Esforço axial do segundo nível de escoramento – 80.ENL12/48

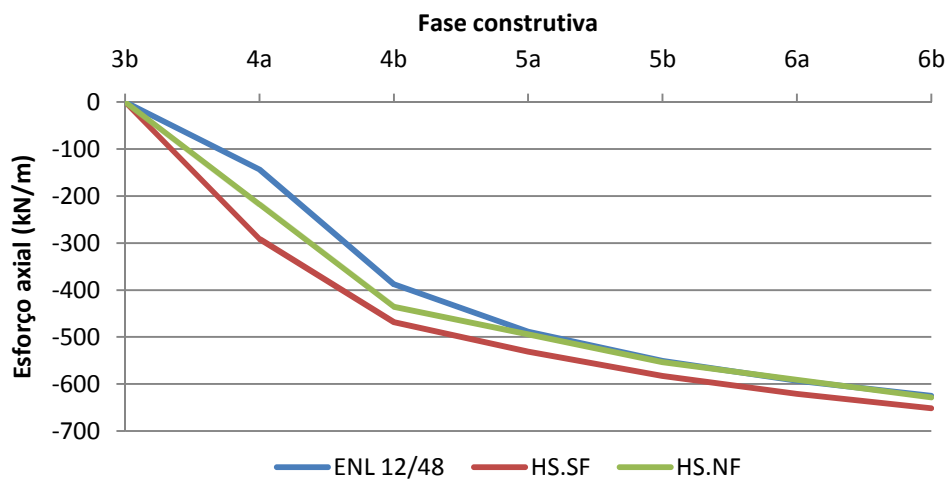


Figura 5.20 – Esforço axial do terceiro nível de escoramento – 80.ENL12/48

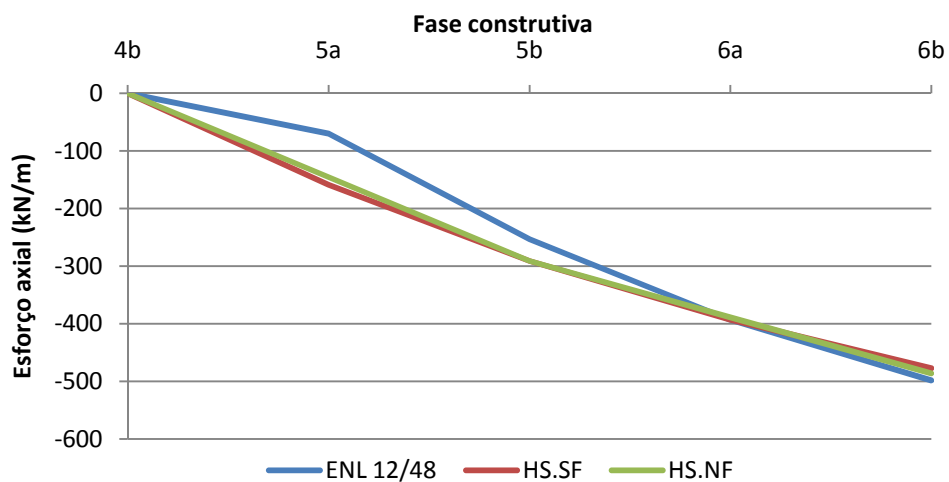


Figura 5.21 – Esforço axial do quarto nível de escoramento – 80.ENL12/48

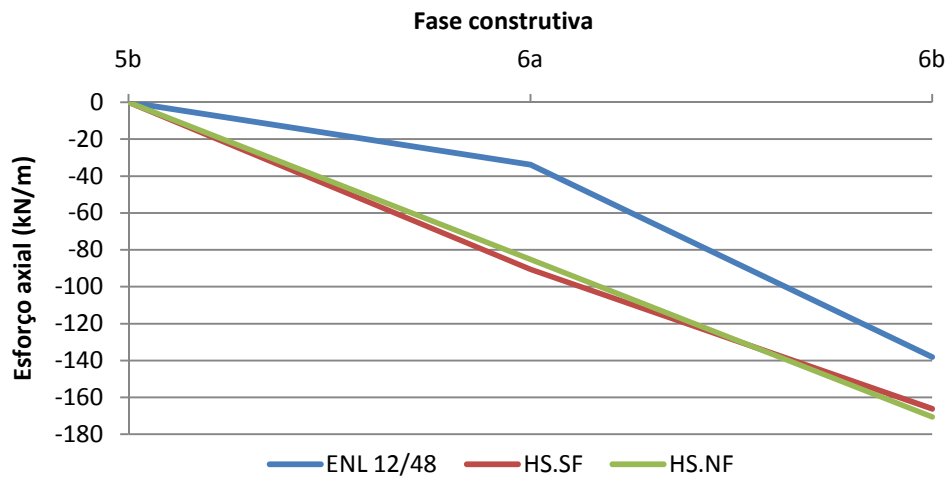


Figura 5.22 – Esforço axial do quinto nível de escoramento – 80.ENL12/48

Comparando os resultados obtidos nesta análise com os das análises anteriores verifica-se que o esforço axial nas escoras na subfase imediatamente após a colocação destas é ainda menor. Este facto resulta de a rigidez inicial ser menor e, por isso, para o mesmo deslocamento o esforço axial é menor. Resulta, então, que o pré-esforço por subfaseamento da escavação com as rigidezes das escoras consideradas nesta análise é ainda menor. Mas, como a rigidez das escoras nas subfases seguintes é maior, os esforços finais aproximam-se dos valores obtidos para as escavações analisadas anteriormente.

Tal como para o primeiro grupo de cálculos, também para este é necessário verificar a validade do modelo utilizado. Para o confirmar, apresenta-se nas Figuras 5.23 a 5.27 o esforço axial dos vários níveis de escoras em função da variação de comprimento que estas sofreram na escavação desta análise, nas escavações subfaseada e não subfaseada com escoras com rigidez igual a 30% da rigidez teórica.

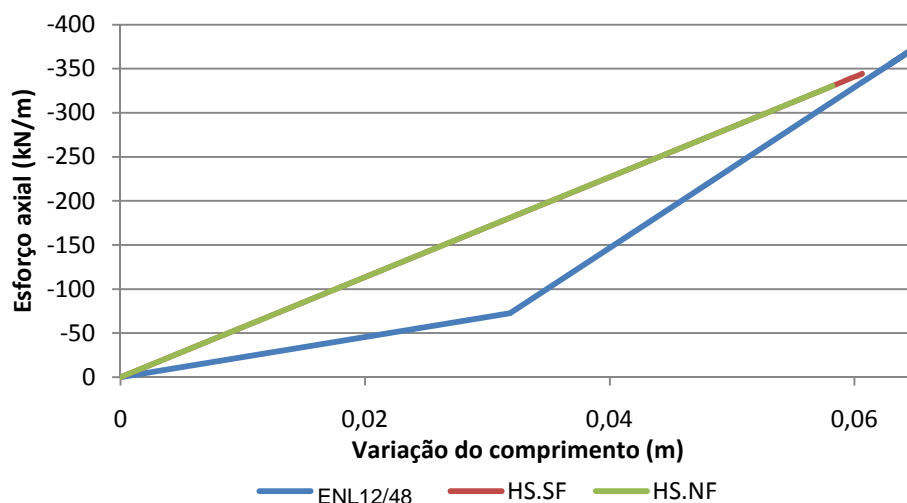


Figura 5.23 – Esforço axial versus variação do comprimento do primeiro nível de escoramento – 80.ENL12/48

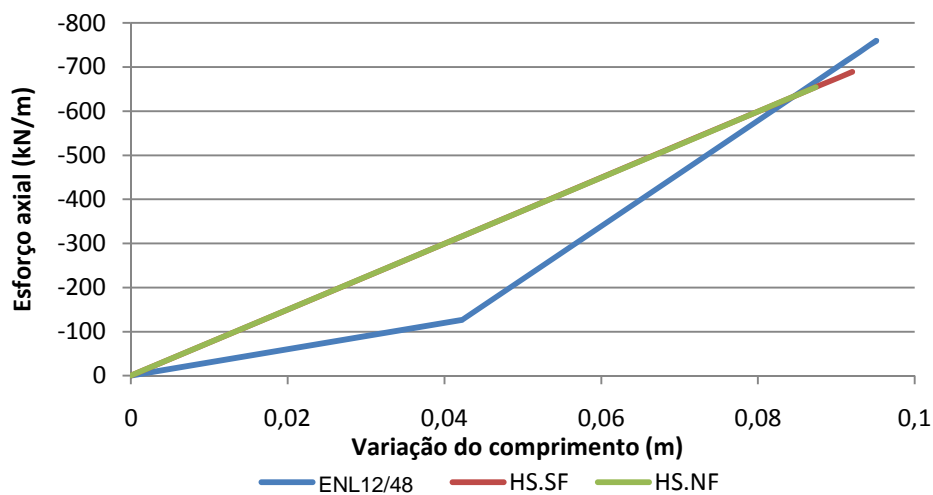


Figura 5.24 – Esforço axial versus variação do comprimento do segundo nível de escoramento – 80.ENL12/48

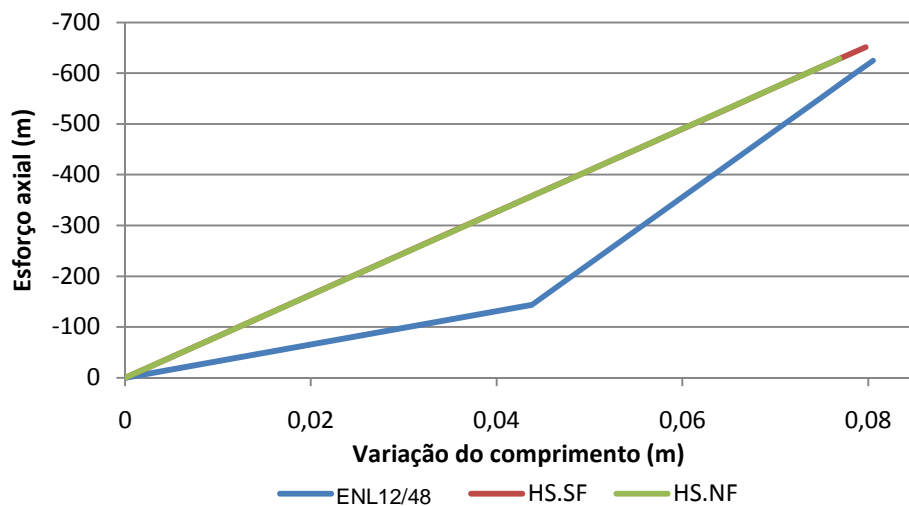


Figura 5.25 – Esforço axial versus variação do comprimento do terceiro nível de escoramento – 80.ENL12/48

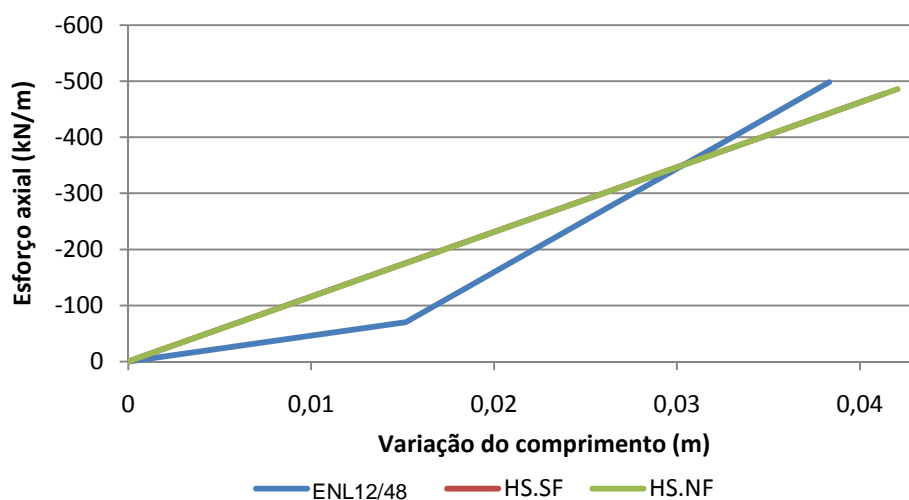


Figura 5.26 – Esforço axial versus variação do comprimento do quarto nível de escoramento – 80.ENL12/48

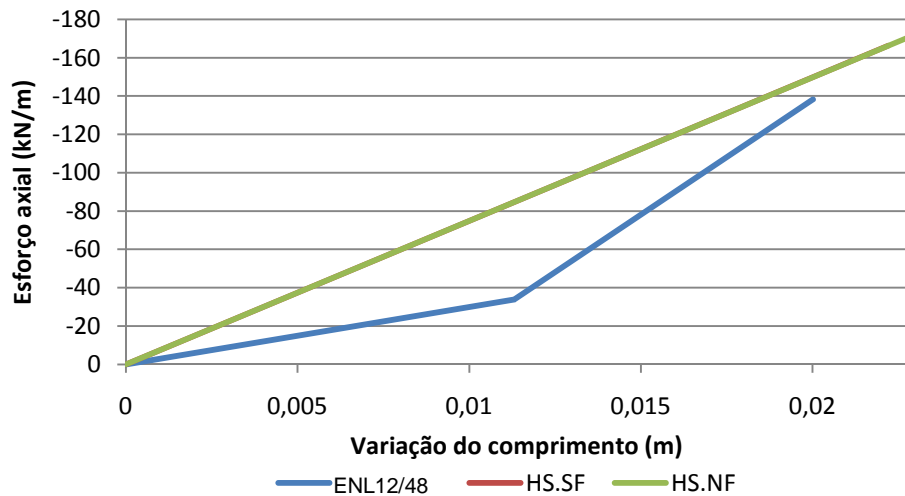


Figura 5.27 – Esforço axial versus variação do comprimento do quinto nível de escoramento – 80.ENL12/48

Como foi visto, as curvas referentes às escavações do capítulo anterior estão sobrepostas porque a rigidez das escoras é igual em ambas.

Comparando as Figuras 5.23 a 5.27 verifica-se que os esforços axiais finais são diferentes entre as escavações em estudo e por esse motivo as escavações HS.NF e ENL12/48 não podem ser directamente comparadas.

5.5. ANÁLISE DE RESULTADOS – ENL20/80

5.5.1. MOVIMENTOS ASSOCIADOS

Analisando agora a escavação em que as escoras têm uma rigidez média maior do que nas análises anteriores, apresenta-se na Figura 5.28 os deslocamentos horizontais da cortina da escavação subfaseada em que as escoras respondem ao carregamento com uma rigidez igual a 20% da rigidez teórica na subfase imediatamente após à sua colocação e nas subfases seguintes com rigidez igual a 80% da rigidez teórica.

Uma vez que o pé da cortina é mantido fixo, o seu comportamento é semelhante ao verificado nas análises anteriores e explicado no Capítulo 3. Com o aumento da rigidez das escoras apenas se verifica uma diminuição dos valores do deslocamento que a cortina sofre comparativamente às escavações analisadas anteriormente. Compreende-se que escoras com maior rigidez tenham o mesmo esforço axial com menor variação do comprimento. Então, é previsível que nesta análise os deslocamentos da cortina sejam menores do que nas análises anteriores.

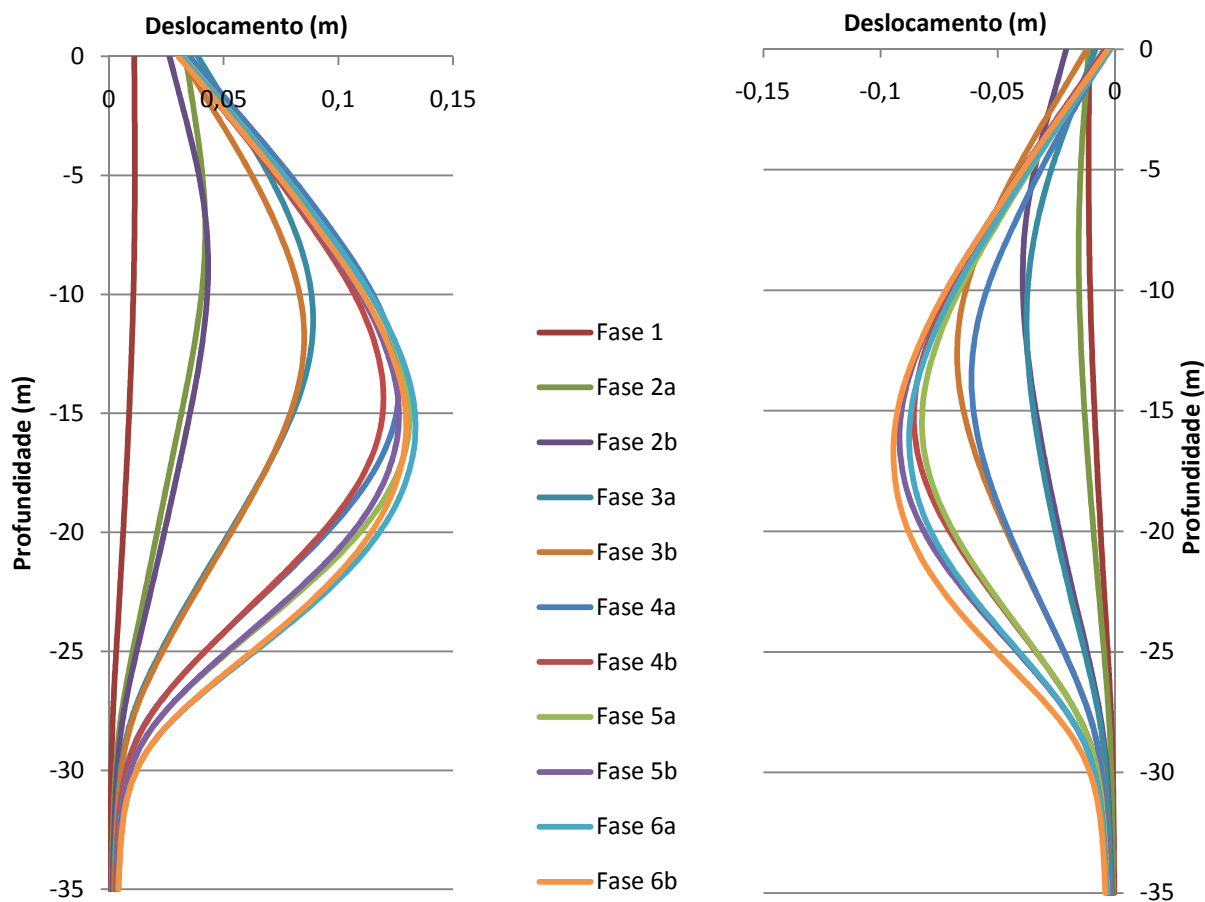


Figura 5.28 – Deslocamentos horizontais da cortina – 80.ENL20/80

Os deslocamentos máximos no topo da cortina obtidos para a escavação ENL20/80 são de 39 mm do lado esquerdo e de 21 mm do lado direito. Os Do lado esquerdo resultou um deslocamento máximo da cortina de 134 mm e do lado direito um deslocamento de 94 mm.

Dada a dificuldade em simular escavações não subfaseadas em que as escoras se comportam com rigidez axial dependente do esforço axial, não é possível fazer uma comparação directa dos valores obtidos nesta escavação com outras já analisadas.

5.5.2. ESFORÇOS ESTRUTURAIS

Os esforços axiais registados nas escoras da escavação subfaseada do terceiro grupo de cálculos estão apresentados na Figura 5.29.

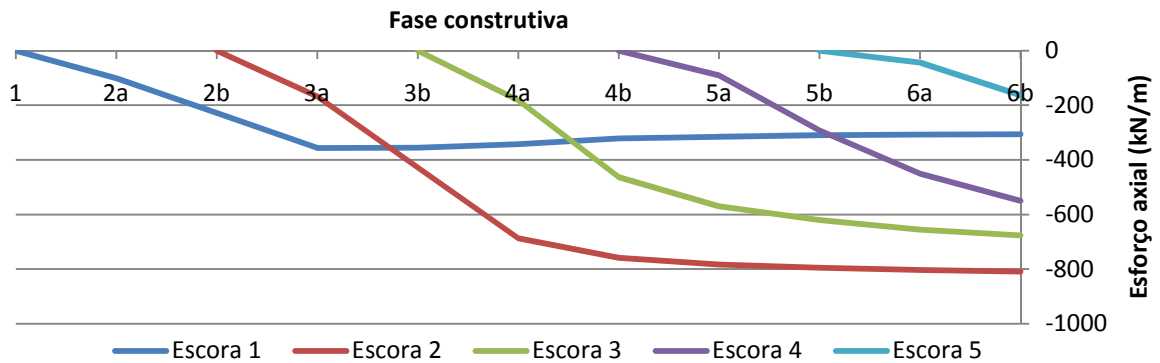


Figura 5.29 – Esforços nas escoras – 80.ENL20/80

Os esforços axiais máximos obtidos são -357 kN/m, -809 kN/m, -676 kN/m, -550 kN/m e -163 kN/m para os níveis de escoramento de 1 a 5, respectivamente.

Como não foram modeladas escavações não subfaseadas com escoras com rigidez constante igual a 50% da rigidez teórica, determinou-se o esforço axial que estas teriam caso sofressem uma variação de comprimento igual às das escoras da escavação 80.ENL20/80.

Nas Figuras 5.30 a 5.34 apresentam-se os diagramas de esforço axial versus variação de comprimento para os vários níveis de escoramento da escavação com escoras com rigidez dependente do esforço axial e para o caso hipotético de as escoras terem rigidez constante ao longo da escavação igual a 50% da rigidez teórica.

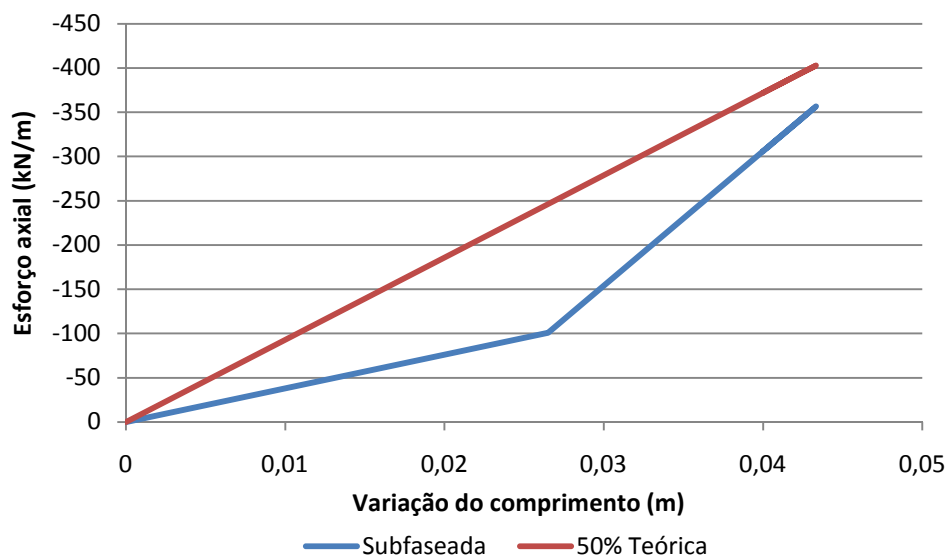


Figura 5.30 – Esforço axial versus variação do comprimento do primeiro nível de escoramento – 80.ENL20/80

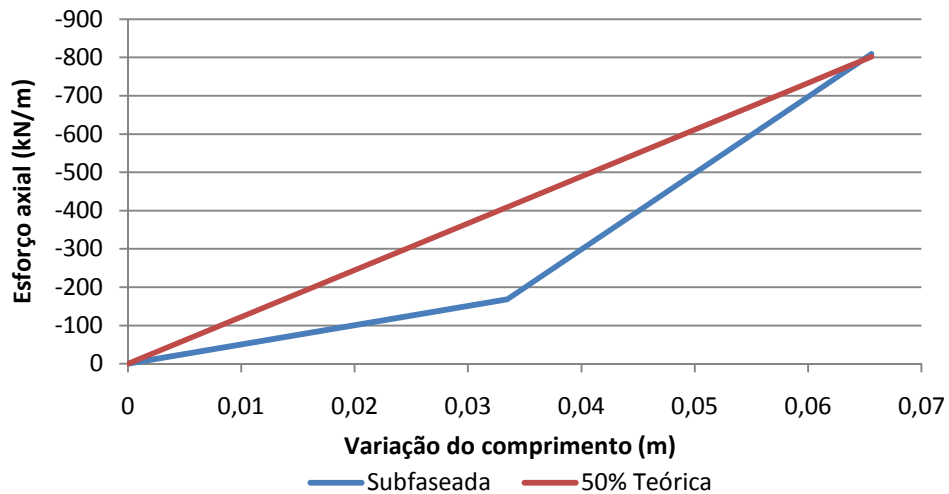


Figura 5.31 – Esforço axial versus variação do comprimento do segundo nível de escoramento – 80.ENL20/80

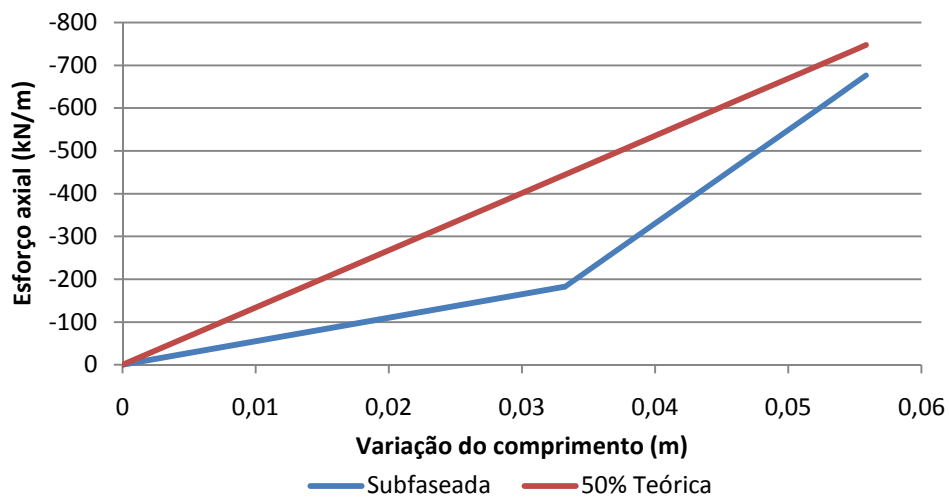


Figura 5.32 – Esforço axial versus variação do comprimento do terceiro nível de escoramento – 80.ENL20/80

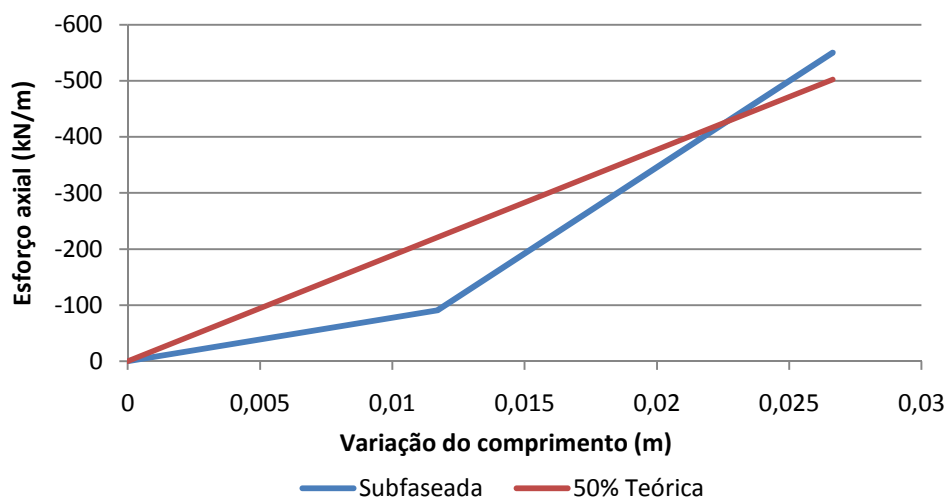


Figura 5.33 – Esforço axial versus variação do comprimento do quarto nível de escoramento – 80.ENL20/80

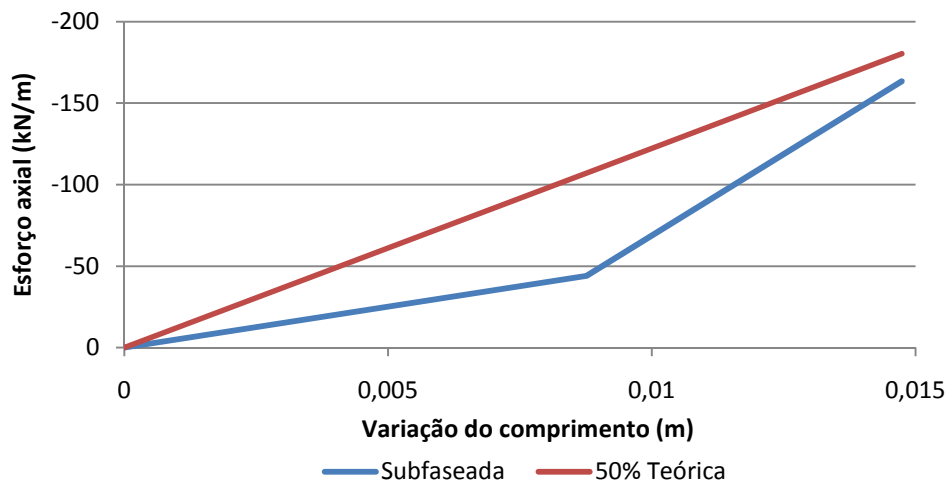


Figura 5.34 – Esforço axial versus variação do comprimento do quinto nível de escoramento – 80.ENL20/80

Dada a dificuldade em avaliar o efeito do subfaseamento da escavação quando são consideradas escoras com comportamento não linear pela inexistência de uma análise não subfaseada com escoras com comportamento não linear, avalia-se o efeito das escoras com comportamento não linear no subfaseamento da escavação de outro modo.

No Quadro 5.3 apresenta-se um resumo dos deslocamentos horizontais máximos das cortinas de ambos os lados obtidos nos dois capítulos anteriores. No mesmo quadro são ainda apresentados o coeficiente entre os valores obtidos para a escavação não subfaseada e subfaseada para a cortina do lado direito e o coeficiente entre os valores obtidos na cortina do lado direito e esquerdo da escavação subfaseada.

Quadro 5.3 – Resumo dos deslocamentos horizontais máximos da cortina para as escavações dos capítulos 3 e 4

	Largura (m)	NF (mm)	SF (mm)		SF _{Direita} /NF	SF _{Direita} /SF _{Esquerda}
			Esquerda	Direita		
Cap. 3	20	87	100	87	1,00	0,87
	30	106	120	103	0,97	0,86
	45	127	143	121	0,95	0,85
	60	142	160	135	0,95	0,84
	80	156	177	149	0,96	0,84
Cap. 4	20	68	85	65	0,96	0,76
	30	80	103	75	0,94	0,73
	45	94	117	88	0,94	0,75
	55	103	124	95	0,92	0,77
	60	107	129	98	0,92	0,76
	70	114	137	104	0,91	0,76
	80	120	144	109	0,91	0,76
	100	131	157	119	0,91	0,76

Uma primeira observação interessante é o facto de a razão $SF_{Direita}/SF_{Esquerda}$ não depender muito da largura de escavação.

Para analisar melhor os valores obtidos, na Figura 5.35 estão representados os valores das razões das duas últimas colunas do Quadro 5.3 correspondentes a cada uma das larguras estudadas. Representa-se ainda a linha de tendência linear para cada um dos modelos constitutivos considerados.

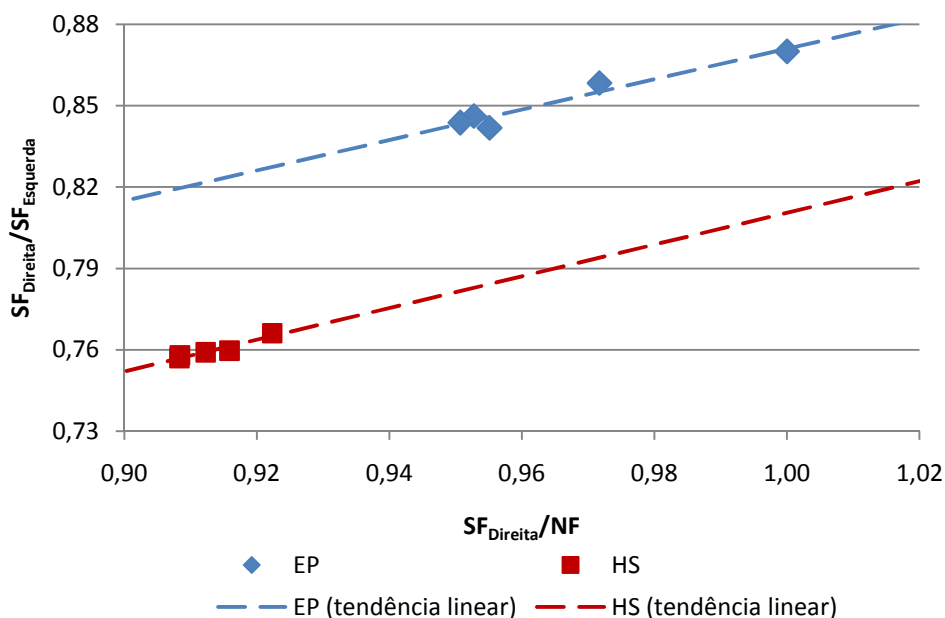


Figura 5.35 – Representação gráfica dos coeficientes do Quadro 5.3

Na Figura 5.35 não foram representados os pontos correspondentes às escavações com larguras de 20 m, 30 m e 45 m com o modelo *hardening soil* por estes se afastarem significativamente dos restantes. Tal poderá dever-se ao facto de que para pequenas larguras de escavação a massa de solo do lado direito, nas subfases que se retira o solo do lado esquerdo, não ser capaz de suportar a cortina do mesmo lado.

Analisando a Figura 5.35 conclui-se que quanto maior é a diferença entre os deslocamentos do lado esquerdo e direito da escavação subfaseada maior é também a diferença entre os deslocamentos do lado direito da escavação subfaseada e não subfaseada.

Com a expressão da linha de tendência linear do modelo *hardening soil* é possível estimar o quociente $SF_{Direita}/NF$ para as escavações com escoras com comportamento não linear. No Quadro 5.4 apresenta-se o quociente entre os deslocamentos máximos obtidos na cortina do lado direito e do lado esquerdo para todas as escavações subfaseadas com largura de 80 m estudadas e a estimativa do quociente entre os deslocamentos da cortina do lado direito da escavação subfaseada e não subfaseada com escoras não lineares.

Quadro 5.4 – Quociente entre os deslocamentos máximos da cortina do lado direito e esquerdo para as escavações subfaseadas com largura de 80 m

	EP	HS	ENL20/40	ENL12/48	ENL20/80
$SF_{Direita} / SF_{Esquerda}$	0,84	0,76	0,73	0,71	0,54
$SF_{Direita} / NF$	–	–	0,86	0,83	0,54

Verifica-se que nas escavações com escoras com rigidez dependente do esforço axial a diferença entre os deslocamentos da cortina do lado esquerdo e direito é maior. Seguindo a dedução anterior, pode concluir-se que nas escavações com escoras com comportamento não linear a diferença dos deslocamentos do lado direito entre escavações subfaseadas e não subfaseadas é maior. Logo, o subfaseamento da escavação tem um maior efeito nas escavações analisadas neste capítulo.

5.6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo procedeu-se à análise de três grupos de cálculos em que se considerou a não linearidade da rigidez das escoras. Verificou-se que os modelos utilizados nas análises se ajustam às tensões médias consideradas. No entanto, uma vez que os esforços finais nas escoras são diferentes nas escavações com escoras lineares e não lineares, não é possível fazer-se uma comparação directa entre escavações subfaseadas e não subfaseadas com rigidez média correspondente.

Através da análise de todas as escavações estudadas neste trabalho, concluiu-se que quanto maior é a diferença entre os deslocamentos do lado direito e esquerdo da escavação subfaseada maior será a diferença entre os deslocamentos do lado direito das escavações subfaseada e não subfaseada.

Isto permite concluir que a diferença entre os deslocamentos da cortina do lado direito das escavações subfaseada e não subfaseada com escoras com comportamento não linear é maior. Uma vez que os modelos que consideram as escoras com rigidez dependente do esforço axial simulam o comportamento de uma estrutura de suporte de terras com maior rigor, o subfaseamento da escavação não deverá ser desprezável.

6

CONCLUSÕES

6.1. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido pretendeu contribuir para o conhecimento de escavações profundas em estratos de solos argilosos moles.

Seguem-se as principais conclusões de cada capítulo.

No capítulo 2 estudou-se a importância do pré-esforço em estruturas de contenção e suporte de terras, constatando que é um dos métodos mais eficazes para a redução dos deslocamentos destas. Foram ainda apresentados os métodos de aplicação de pré-esforço em escoras, de entre os quais, o subfaseamento da escavação que foi objecto de estudo deste trabalho.

No capítulo 3 analisou-se o efeito do pré-esforço através do subfaseamento da escavação comparando várias escavações subfaseadas com escavações não subfaseadas modeladas com um modelo do solo do tipo elástico-perfeitamente plástico, chegando-se à conclusão que o subfaseamento permite reduzir os deslocamentos de um dos lados da escavação, reduzindo assim os assentamentos da superfície. Esta redução é tanto maior quanto maior é a largura da escavação, até um determinado limite.

No capítulo 4 foram feitas as mesmas análises análogas à do capítulo 3 mas usando um modelo constitutivo em que o solo responde com uma rigidez dependente da trajectória de tensões, verificando-se que o benefício do subfaseamento da escavação na redução dos deslocamentos é ainda maior devido à rigidez de descarga-recarga ser maior do que a rigidez de primeira-carga.

No capítulo 5 foram analisadas escavações em que as escoras têm rigidez axial dependente do esforço axial. Verificou-se que o subfaseamento da escavação tem maior efeito considerando escoras com comportamento não linear do que escoras com rigidez constante ao longo de toda a escavação.

Conclui-se, portanto, que o subfaseamento da escavação poderá constituir um contributo não desprezável na viabilidade de determinadas obras em solos argilosos moles. Uma vez que há obras que não são executadas por não serem viáveis devido à possibilidade de provocarem danos em estruturas vizinhas que possam existir de um dos lados da escavação.

BIBLIOGRAFIA

- Fortunato, Eduardo. e Matos Fernandes, M. (1997). *Escavações escoradas em solos moles: Análise conjunta dos efeitos da altura enterrada da parede e da resistência da interface solo-cortina*. 6º Congresso Nacional de Geotecnia - A Geotecnia nas Infraestruturas de Transporte, Energia e Ambiente, Lisboa, Vol. 2, pp. 915-924.
- Hashash, Youssef M. A. & Whittle, Andrew J. (1996), *Ground movement prediction for deep excavations in soft clay*. Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 122, No. 6, pp. 474-486.
- Mateus Brito, J. A. e Matos Fernandes, M. (2006) Estação Terreiro do Paço do Metropolitano de Lisboa: concepção, previsões de projecto e desempenho. III Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, Curitiba, pp. 21-42.
- Matos Fernandes, M. (1983). *Estruturas Flexíveis para Suporte de Terras: Novos Métodos de Dimensionamento*. Tese de Doutoramento, FEUP, Porto.
- Matos Fernandes, M. (1990). *Estruturas de Suporte de Terras*. Textos de apoio, FEUP, Porto.
- Matos Fernandes, M. (1995). *Mecânica dos Solos II Volume*. FEUP, Porto.
- Matos Fernandes, M. (2004). *Escavações suportadas. A interação solo-estrutura vista através das tensões tangenciais na interface*. Solos e Rochas, São Paulo, Vol. 27, nº1, pp. 3-14.
- Ng, Charles W.W. & Lings, Martin L. (1995). *Effects of modeling soil nonlinearity and wall installation on back-analysis of deep excavation in stiff clay*. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 10, pp. 687-695.
- O'Rourke, Thomas D. (1981). *Ground movements caused by braced excavations*. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, No. 9, pp. 1159-1178.
- Perdigão, Pedro Emanuel Reis. (1999). *Sistemas de Pré-Esforço em Escavações Escoradas*. Tese de Mestrado, FEUP, Porto.
- Pereira, Carlos Duarte Dias. (2008). *Aplicação de Jet-Grouting em Escavações Profundas em Solos Moles*. Tese de MIEC, FEUP, Porto.
- Raposo, Nuno Pereira. (2008). *Pré-dimensionamento de Estruturas de Contenção Ancoradas*. Tese de Mestrado, FEUP, Porto.
- Schanz, T., Vermeer, P.A. & Bonnier, P.G. (1999). *The Hardening Soil Model: Formulation and Verification*. 1st International PLAXIS Symposium on Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Amesterdão Holanda, pp. 281-296.
- Viggiani, Gioacchino & Tamagnini, Claudio. (1999) *Ground movements around excavations in granular soils: a few remarks on the influence of the constitutive assumptions on FE predictions*. Mechanics of Cohesive-Frictional Materials, Julho 2000, pp. 399-423.

